

Fabício Borges de Oliveira

**INVESTIGAÇÃO E REDUÇÃO DOS EFEITOS TÉRMICOS EM
MEDIÇÕES GEOMÉTRICAS POR TOMOGRAFIA
COMPUTADORIZADA DE RAIOS X**

Dissertação submetida ao Programa de
pós-graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Gustavo Daniel
Donatelli, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Maurício de
Campos Porath, Dr. -Ing.

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Oliveira, Fabrício Borges de

Investigação e redução dos efeitos térmicos em medições
geométricas por tomografia computadorizada de raios x /
Fabrício Borges de Oliveira ; orientador, Gustavo Daniel
Donatelli ; co-orientador, Maurício de Campos Porath. -
Florianópolis, SC, 2013.

76 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Tomografia computadorizada.
3. Metrologia dimensional. 4. Deriva térmica. I.
Donatelli, Gustavo Daniel . II. Porath, Maurício de Campos.
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Fabício Borges de Oliveira

**INVESTIGAÇÃO E REDUÇÃO DOS EFEITOS TÉRMICOS EM
MEDIÇÕES GEOMÉTRICAS POR TOMOGRAFIA
COMPUTADORIZADA DE RAIOS X**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 14 de outubro de 2013.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Maurício de Campos Porath, Dr.-Ing.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Celso Peres Fernandes , Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Christian Raffaello Baldo, Dr. Eng.
Fundação CERTI

Dedico esta, bem como todas as
minhas conquistas, aos meus
amados pais (Nei e Ismênia) e
irmãos (Francine e Franciel).

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, aos meus amados pais (Nei e Ismênia) e irmãos (Francine e Franciel) pelo amor, apoio e carinho incondicional nesta e em todas as etapas da minha vida.

Agradeço também a todos os professores que tive a honra de aprender e compartilhar conhecimentos indispensáveis para realização deste trabalho, em especial ao meu orientador Prof. Gustavo Daniel Donatelli e meu coorientador Prof. Maurício de Campos Porath, pela paciência, amizade e valiosa orientação. À equipe de trabalho composta por Francisco Arenhart e Vitor Nardelli pelas discussões, incentivo, aprendizado e amizade.

Não posso deixar de agradecer aos professores que me incentivaram para iniciar o mestrado e recomendaram para programa, Prof. Marcelo Vandresen, Prof. Milton Pereira e Prof. André de Sousa

Agradeço também, a todos os colegas de laboratório que contribuíram direta ou indiretamente com a realização deste trabalho, em especial Analucia Fantin pela importante contribuição.

À Milena Victorette, agradeço pela paciência, incentivo, força e principalmente pelo carinho ao longo dessa empreitada.

Aos amigos conquistados Gabriel Probst, Viviane Cirio, Mauro Benedet, Carolina Livi, Átila Paes, Angelina Uesato, James Eger, Aarão Foinquinhos, Cláudio Schmitz, Cristina Sampaio, Natalia Boelter, Natália Vianna, Gabriel Tatsch e Christopher Isenberg pelas sugestões e contribuição em relação à pesquisa bem como, pelos momentos de descontração e divertimento.

Além disso, quero agradecer ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC pela oportunidade, as agências de fomento que financiaram esse trabalho (CNPq e CAPES).

Finalmente, agradeço à Fundação CERTI, LABMETRO e WZL - RWTH/AACHEN pela excelente estrutura fornecida.

RESUMO

A ocorrência de deriva térmica em sistemas de tomografia computadorizada industrial (TC) tem sido reportada como uma significativa fonte de erros em avaliações geométricas. Durante o processo de varredura, aquecimento dentro da cabine e variações das condições ambientais podem afetar a posição do ponto focal e distorcer o sistema manipulador, levando a deslocamentos relativos das projeções radiográficas e distorções no volume reconstruído. Estratégias para minimizar fontes de incertezas da medição relacionadas a gradientes térmicos podem ser classificadas em: A) redução das variações de temperatura; B) redução dos efeitos de variações de temperatura; C) quantificação e compensação dos efeitos de variações de temperatura. O presente trabalho apresenta uma avaliação experimental da efetividade das estratégias A e C. Uma comparação de duas gerações do mesmo modelo de sistema tomográfico foi realizada, tendo o equipamento mais recente sistemas aprimorados de exaustão da cabine e arrefecimento do tubo de raios X. A efetividade do aprimoramento do equipamento foi verificada através da avaliação do desvio de forma de uma esfera de precisão. Os resultados mostraram uma melhoria relevante na estabilidade das projeções, levando a uma redução estatisticamente significativa dos valores de desvio de circularidade no equipamento mais recente. Além disso, um método de correção baseado na manipulação das projeções foi desenvolvido e testado. O método consiste em repetir a aquisição da primeira projeção ao final do processo de varredura e calcular o vetor deslocamento entre as projeções. As projeções remanescentes são corrigidas proporcionalmente a esse deslocamento total. A efetividade dessa correção também foi avaliada através do desvio de forma medido em uma esfera de precisão. Os valores de circularidade medidos após a implementação da correção foram significativamente menores, validando a utilidade da estratégia C.

Palavras-chave: tomografia computadorizada, metrologia dimensional, deriva térmica.

ABSTRACT

The occurrence of thermal drifts in industrial computed tomography (CT) systems has been reported as a significant source of error on geometrical evaluations. During CT-scans, heating inside the cabinet and varying environmental conditions may affect the position of the focal spot and distort the manipulator system, leading to relative displacement of X-ray projections and distortions in the reconstructed 3D image. Strategies to minimize the measurement uncertainty arising from thermal drifts can be classified in: A) reducing the temperature variations; B) reducing the effect of temperature variation; C) quantifying and compensating the effect of temperature variation. This work presents an experimental evaluation on the effectiveness of strategies A and C. A comparison of two generations of the same CT-system model – the newer one having improved X-ray tube cooling exhaust systems – was performed. The effectiveness of the hardware improvement was tested comparing the roundness deviation of a precision sphere obtained with both systems. The results showed a relevant improvement on the stability of projections, leading to a statistically significant reduction of the roundness deviation values. Furthermore, a correction method based on the manipulation of the projections was developed and tested. The method consists in repeating the acquisition of the first projection at the end of the scan and calculating the displacement vector between these projections. The remaining projections are then corrected proportionally to this total displacement. To test the effectiveness of the method the same precision sphere and CT-systems were used. The results also showed a statistically significant reduction of the roundness deviation values, which validates the usefulness of strategy C.

Keywords: Computed tomography. Dimensional metrology. Thermal drift.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes básicos do sistema mecânico de um tomógrafo industrial de feixe cônico e principais parâmetros de configuração geométricos.....	24
Figura 2 - Cadeia de medição por metro-TC	28
Figura 3 - Fontes de perturbação térmica na câmara do tomógrafo.....	30
Figura 4 - Esquemático dos componentes de um tubo de raios X	31
Figura 5 - Câmara de blindagem do tomógrafo Carl Zeiss METROTOM 1500.....	32
Figura 6 - Disposição dos sensores de temperatura (Pt-100) no interior e exterior da câmara de metro-TC.....	33
Figura 7 - Mapeamento térmico durante o processo de aquisição das projeções por metro-TC.....	33
Figura 8 - Vista frontal da geometria do tomógrafo	34
Figura 9 - Efeito do deslocamento do eixo da mesa rotativa na projeção... 35	
Figura 10 - Efeito na imagem reconstruída sem (a) e com (b) deslocamento do manipulador mecânico.....	35
Figura 11 - Efeito do deslocamento gradativo do ponto focal na projeção ao longo do processo de aquisição das projeções.....	37
Figura 12 - Efeito na imagem de projeção causado pela inclinação do painel de detecção em torno dos eixos z, y e x.....	39
Figura 13 - Efeito da inclinação do detector α na imagem volumétrica, imagem sem o efeito de inclinação (a), imagem com o efeito de inclinação em α (b).....	40
Figura 14 - Fixação da esfera na mesa rotativa do tomógrafo	44
Figura 15 - Processo de extração das coordenadas do centro da circunferência obtida em cada projeção do objeto teste no <i>software</i> MATLAB®	46
Figura 16 - Deslocamento nas projeções causado por derivas térmicas no sistema tomográfico TC_A.....	47
Figura 17 - Deslocamento nas projeções causado por derivas térmicas no sistema tomográfico TC_B.....	47

Figura 18 - Extração da linha circunferencial a partir do volume reconstruído	48
Figura 19 - Representações polar (linha azul: representação espacial da linha extraída a partir dos dados tomográficos, linha vermelha: representação da circunferência ajustada) e de conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída a partir da esfera reconstruída do sistema TC_A.....	49
Figura 20 - Representações polar (linha azul: representação espacial da linha extraída a partir dos dados tomográficos, linha vermelha: representação da circunferência ajustada) e de conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída a partir da esfera reconstruída do sistema TC_B	49
Figura 21 - Peças tomografadas, artefato calibrado em alumínio (a), <i>step cylinder</i> em poliacetal (POM) (b), e padrão de múltiplas ondas (MWS) em alumínio (c).....	50
Figura 22 - Representações polar (linha azul: representação espacial do perfil filtrado extraído a partir dos dados tomográficos, linha vermelha: representação da circunferência ajustada) e de conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída a partir de um artefato calibrado com diâmetro nominal de 90 mm	51
Figura 23 - Representações polar (linha azul: representação espacial do perfil filtrado extraído a partir dos dados tomográficos, linha vermelha: representação da circunferência ajustada) e de conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída a partir de um <i>step cylinder</i> com diâmetro nominal de 42 mm.....	52
Figura 24 - Representações polar (linha azul: representação espacial do perfil filtrado extraído a partir dos dados tomográficos, linha vermelha: representação da circunferência ajustada) e conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída a partir de um MWS com ondas projetadas nas componentes de (25, 50, 100, 200 e 400) OPR.	53
Figura 25 - Dados de TC simulados: (a) esfera reconstruída com deslocamento total de 10 mm e (b) com deslocamento total de 0,1 mm; (c), (d) representações da linha circunferencial extraída de (b).....	54
Figura 26 - Cadeia de medição completa por metro-TC, abrangendo o processo de quantificação de deriva e correção das projeções ..	58

Figura 27 - Vetor deslocamento da deriva.....	58
Figura 28 - Comparação dos perfis circulares sem (linha sólida) e com correção (linha tracejada)	60
Figura 29 - Comparação dos conteúdos dinâmicos sem (a) e com correção (b)	60
Figura 30 - Comparação dos valores de RONt obtidos sem (a) e (b), e com correção (c) e (d).	61
Figura 31 - Comparação dos perfis circulares TC_A (linha sólida) e TC_B (linha tracejada).	62
Figura 32 - Comparação dos conteúdos dinâmicos do sistema TC_A (a) com o sistema TC_B (b).....	63
Figura 33 - Comparação dos valores de RONt obtidos em TC_A (a) e (b), e em TC_B (c) e (d).....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TC	Tomografia Computadorizada
MMC	Máquina de Medição por coordenadas
metro-TC	Tomografia Computadorizada para metrologia dimensional industrial
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
WZL	<i>Werkzeugmaschinenlabor</i> (Laboratório de máquinas-ferramenta de Aachen, na Alemanha)
RWTH	<i>Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule</i> (Universidade Técnica da Renânia do Norte-Vestfália)
BRAGECRIM	<i>Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology</i> (Iniciativa de Colaboração Brasil-Alemanha na Pesquisa em Tecnologia da Manufatura)
FBP	<i>Filtered Back projection</i> (Retro projeção Filtrada)
FDK	Feldkamp Davis e Kress
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
CERTI	Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras
TC_A	Versão A do sistema de tomografia computadorizada
TC_B	Versão B do sistema de tomografia computadorizada
OPR	Ondas por revolução
RONt	<i>Roundness total</i> (circularidade total)
POM	Poliacetal
MWS	<i>Multi-Wave Standard</i> (Padrão de Multiplas ondas)

LISTA DE SÍMBOLOS

D_{SO}	Distância entre a fonte de radiação e objeto
D_{SD}	Distância entre a fonte de radiação e detector
α_o	Inclinação do objeto em torno do eixo x no sistema tomográfico
β_o	Inclinação do objeto em torno do eixo y no sistema tomográfico
α	Inclinação do detector em torno do eixo x no sistema tomográfico
β	Inclinação do detector em torno do eixo y no sistema tomográfico
γ	Inclinação do detector em torno do eixo z no sistema tomográfico
s_z	Deslocamento da fonte na direção do eixo z no sistema tomográfico
s_y	Deslocamento da fonte na direção do eixo y no sistema tomográfico
m	Fator de ampliação obtido no tomógrafo
U	Parâmetro de configuração de TC: Tensão elétrica do tubo de raios X [kV]
I	Parâmetro de configuração de TC: Corrente elétrica do tubo de raios X [μA]
B	Parâmetro de configuração de TC: Tempo de integração [ms]
E	Parâmetro de configuração de TC: Ganho do detector [vezes]
V	Parâmetro de configuração de TC: Espessura do Pré-filtro [mm]
P	Parâmetro de configuração de TC: Número de projeções por revolução

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
2	GRADIENTES TÉRMICOS EM METRO TC	27
2.1	TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA PARA METROLOGIA GEOMÉTRICA E DIMENSIONAL	27
2.2	CAUSAS DE GRADIENTES TÉRMICOS EM METRO-TC ...	29
2.2.1	Experimento preliminar	32
2.3	EFEITOS DOS GRADIENTES TÉRMICOS EM METRO-TC	34
2.3.1	Distorções no manipulador mecânico	34
2.3.2	Deriva do ponto focal.....	36
2.3.3	Distorções no detector.....	38
2.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO	40
3	PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVOS.....	41
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	41
3.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	42
3.2.1	Objetivo geral	42
3.2.2	Objetivos específicos	42
4	INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DE DERIVA TÉRMICA EM MEDIÇÕES GEOMÉTRICAS POR METRO-TC	43
4.1	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	43
4.2	ANÁLISE DA RESPOSTA DO TRANSIENTE DO SISTEMA DE METRO-TC.....	45

4.3	INFLUÊNCIA DA DERIVA TÉRMICA EM MEDIÇÕES GEOMÉTRICAS POR METRO-TC	48
4.4	INFLUÊNCIA DA DERIVA EM OBJETOS DIVERSOS.....	50
4.5	ANÁLISE POR SIMULAÇÃO	53
4.6	SÍNTESE DO CAPÍTULO	55
5	PROPOSTA PARA REDUÇÃO DOS EFEITOS DE DERIVA TÉRMICA	57
5.1	CORREÇÃO NUMÉRICA DA DERIVA TÉRMICA	57
5.2	COMPARAÇÃO COM OUTRAS ABORDAGENS (ESTRATÉGIA A).....	61
5.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO	64
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
6.1	CONCLUSÕES.....	67
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A tomografia computadorizada de raios X (TC) é uma versátil técnica de aquisição de imagens, capaz de gerar representações volumétricas a partir de um conjunto de imagens bidimensionais denominadas projeções.

Tecnologia consolidada há mais de trinta anos em aplicações industriais, recentemente vem se destacando como uma alternativa aos métodos tácteis e ópticos de medição por coordenadas [1]. Esse novo campo de aplicação somente foi possível pela disponibilidade de sistemas com melhores características metrológicas, i.e., sistemas de manipulação mais precisos, painéis de detecção de alta resolução e com a redução do tamanho dos pontos focais nos tubos de raios X. A possibilidade de realizar análises não destrutivas no interior da peça e simultaneamente realizar controle de qualidade dimensional e de integridade do material, particulariza a tecnologia de TC em relação a outros sistemas de medição por coordenadas [2][3].

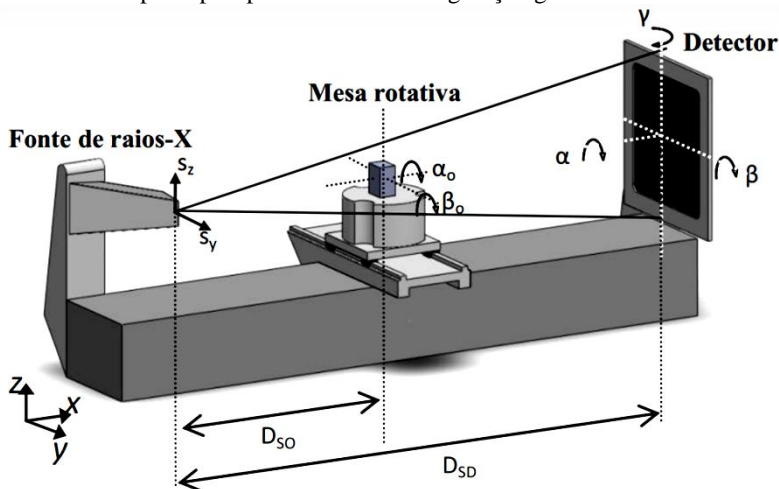
Atualmente, o controle de qualidade de peças plásticas injetadas se caracteriza como uma promissora área de aplicação da tomografia computadorizada para metrologia dimensional (metro-TC). Além disso, a metro-TC vem sendo utilizada em vários outros setores da indústria e em pesquisa e desenvolvimento (P&D). Dentre as aplicações da metro-TC estão a análise de características dimensionais e geométricas de peças, medição de espessura de parede, medição de formas livres e engenharia reversa [4][5]. A essas aplicações metrológicas somam-se as aplicações de análise de materiais, como a análise de fibras em materiais compósitos e a análise de porosidade [6]. Recentes estudos apontam ainda, possíveis aplicações em engenharia biomédica [7], prototipagem rápida [8] e medições de componentes micro mecânicos [9].

Mais recentemente, a North Star Imaging, Inc. desenvolveu uma ferramenta computacional capaz de realizar, além da análise de materiais e características geométricas da peça, a visualização de montagens e materiais em movimento, permitindo, por exemplo, a avaliação da funcionalidade de um conjunto de engrenagens e a passagem de um líquido em um filtro [10].

Uma limitante da vasta aplicação da TC em metrologia industrial é a presença de efeitos sistemáticos não corrigidos [11]. Dentre as causas desses erros destaca-se a presença de gradientes térmicos no sistema de medição. Esses gradientes, causados principalmente por fontes de calor confinadas na cabine, levam a movimentos relativos nos componentes do tomógrafo, afetando a geometria do equipamento e causando alterações em

parâmetros de configuração como a posição relativa entre fonte de raios X, objeto e detector (distâncias D_{SO} e D_{SD} na Figura 1), ângulos de inclinação na mesa rotativa (ângulos α_o e β_o na Figura 1), ângulos de inclinação no detector (ângulos α , β e γ na Figura 1) e deslocamentos na fonte de radiação (s_z e s_y na Figura 1) [12][13]. Essas mudanças na geometria são de difícil quantificação e levam a erros de escala e distorções (e.g. bordas duplas) no volume reconstruído.

Figura 1 - Componentes básicos do sistema mecânico de um tomógrafo industrial de feixe cônico e principais parâmetros de configuração geométricos



Do ponto de vista metrológico, pontos focais infinitesimalmente pequenos são desejáveis devido à possibilidade de gerar transições ar-material mais nítidas, permitindo assim uma extração de superfície mais exata [14]. Por outro lado, essa condição leva ao aumento da temperatura no tubo de raios X, devido à concentração dos elétrons no alvo enquanto a radiação é gerada. Esse aquecimento é o maior causador do deslocamento do ponto focal durante o processo de varredura^[1] e da consequente deriva gradativa das posições das projeções geradas [15][16][17]. O efeito de

¹ Tradução do inglês para "*scanning*": no presente contexto refere-se ao processo de aquisição das imagens por TC. Obs: No decorrer deste documento serão encontrados alguns termos em outros idiomas, pois são utilizados nesta área de estudo. Estes termos serão traduzidos na primeira vez em que aparecerem no texto. No entanto, sempre que o autor julgar adequado, os termos poderão aparecer já traduzidos no próprio texto.

deriva térmica do ponto focal tem sido reportado como uma das principais não idealidades do sistema de TC [18].

Diante deste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo demonstrar por meio de investigação numérico-experimental a influência da deriva térmica em medições geométricas por metro-TC, bem como, apresentar, testar e validar uma proposta para redução dos efeitos de deriva térmica em medições geométricas por metro-TC.

A pesquisa que deu origem ao presente trabalho foi conduzida em parceria com o Laboratório de Máquinas Ferramenta (WZL) da Universidade Técnica da Renânia do Norte-Vestfália em Aachen (RWTH/AACHEN) na Alemanha, e está inserida no escopo da Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura (BRAGECRIM).

O conhecimento da tecnologia e dos fenômenos relacionados a transientes térmicos em componentes de um sistema tomográfico é indispensável, especialmente na interpretação dos resultados de medição gerados por metro-TC. Nesse contexto, o capítulo 2 deste documento apresenta uma revisão bibliográfica a respeito da influência de gradientes térmicos em medições geométricas por metro-TC, bem como, o efeito do transiente térmico em cada um dos principais componentes de um sistema de metro-TC. No capítulo 3 serão descritos detalhadamente o problema de pesquisa e os objetivos do trabalho.

No capítulo 4 é apresentado um estudo numérico-experimental que visa caracterizar a resposta dos sistemas de metro-TC a transientes térmicos temporais.

No capítulo 5 uma proposta de redução do efeito do transiente térmico temporal é apresentada e avaliada experimentalmente. A proposta é baseada na manipulação matemática das projeções. Essa solução é validada a partir da avaliação de uma característica geométrica de uma medida materializada calibrada e por um estudo estatístico. Uma comparação de duas gerações do mesmo modelo de sistema tomográfico foi realizada, tendo o equipamento mais recente sistemas aprimorados de exaustão da cabine e arrefecimento do tubo de raios X. A efetividade do aprimoramento do equipamento foi verificada através da avaliação de uma característica geométrica de uma medida materializada calibrada e por um estudo estatístico.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta conclusões e discussões sobre os resultados obtidos, bem como propostas para trabalhos futuros.

2 GRADIENTES TÉRMICOS EM METRO TC

Esta seção aborda a revisão bibliográfica a respeito da tomografia computadorizada para metrologia geométrica e das causas e efeitos de gradientes térmicos.

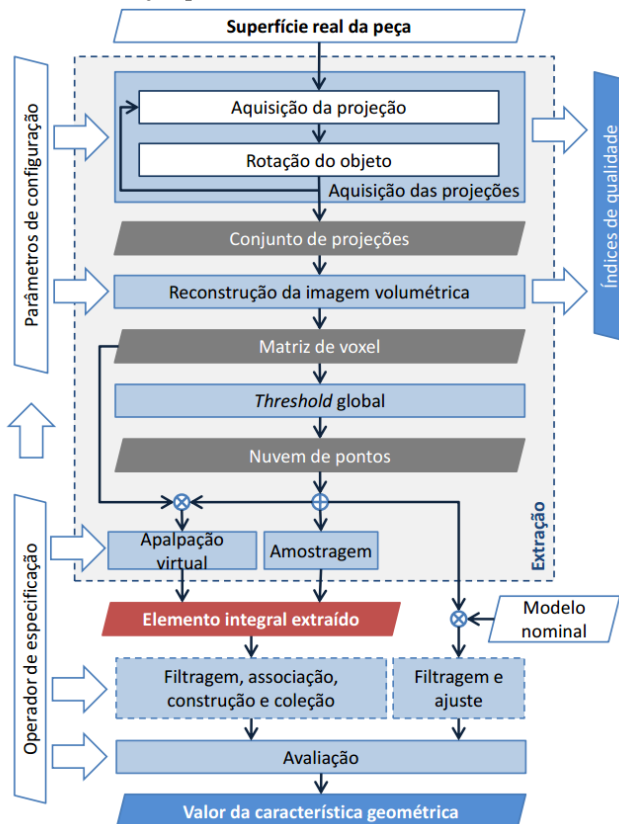
2.1 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA PARA METROLOGIA GEOMÉTRICA E DIMENSIONAL

O primeiro tomógrafo para aplicações médicas foi desenvolvido em 1969 pelo EMI Research Laboratories e logo começou a se difundir nos hospitais [19]. Pouco tempo depois, a indústria começou a usufruir do potencial tecnológico da inovadora técnica de aquisição de imagens, sendo esse, o único método capaz de obter representações volumétricas do interior de objetos de maneira não destrutiva [20]. Como ferramenta para controle dimensional, a TC foi introduzida no final da década de 80 para medição de espessura de parede [21][22]. Em 2005, a Werth Messtechnik GmbH exibiu pela primeira vez um tomógrafo como máquina de medição por coordenadas em uma feira de tecnologia na Alemanha [23].

Em contraste com a configuração dos equipamentos encontrados para diagnósticos médicos, em metro-tomógrafos o objeto que se deseja analisar é posicionado sobre uma mesa e rotacionado entre a fonte e o detector. Essa configuração promove melhor exatidão posicional entre os componentes do sistema [12][24][25].

A medição por metro-TC é realizada em várias etapas. Os passos do processo de medição a partir da superfície real da peça até o valor da característica avaliada estão esquematizados na Figura 2.

Figura 2 - Cadeia de medição por metro-TC



Fonte: Adaptado de [26]

O princípio básico da metro-TC é baseado na atenuação dos raios X, resultado da interação radiação-material. A radiação emitida pela fonte é parcialmente absorvida pelo objeto, e a intensidade de radiação remanescente é detectada pelo painel de detecção. Durante uma medição por metro-TC, as imagens adquiridas pelo detector são obtidas a partir de diferentes direções do objeto, com incremento angular predefinido pelo usuário. Em cada incremento angular, uma nova radiografia é realizada. Para uma completa varredura do objeto uma revolução completa (360°) é normalmente realizada.

As projeções armazenadas são numericamente reconstruídas em um modelo volumétrico tridimensional. Essa reconstrução é realizada através de algoritmos computacionais baseados no método da retro projeção

filtrada (FBP). Os algoritmos de FBP são implementações da solução matemática publicada em 1917 pelo matemático Johann Radon [27]. Feldkamp, Davis e Kress publicaram em 1984, um dos algoritmos (algoritmo FDK) mais difundidos para reconstrução de imagens adquiridas em tomógrafos com fontes de feixe cônico (tipo usual em metro-TC) [28]. O resultado da reconstrução é uma matriz tridimensional (matriz de voxels) em níveis de cinza, que representa a distribuição dos coeficientes de absorção reconstruídos para cada ponto da peça. Esta matriz é a base para todas as análises subsequentes.

Dados quantitativos a partir de imagens tomográficas somente podem ser obtidos após a superfície do objeto ser extraída da matriz de voxels. A extração de superfície (*threshold*^[2]) basicamente consiste em identificar as bordas de um objeto ou interseção entre diferentes materiais em um mesmo objeto.

Existem dois métodos principais para realizar a extração de superfície na matriz de voxels, os métodos denominados *threshold* global [29][30] e *threshold* local [31][32]. O valor do *threshold* global corresponde ao valor médio entre os picos do histograma, onde os valores maiores correspondem à peça e os valores menores correspondem ao meio. Nesse método podem ocorrer erros sistemáticos de deslocamento de superfície. O *threshold* local é um método que visa reduzir esses erros. Nesse método, a superfície é previamente identificada possibilitando que os valores dos níveis de cinza sejam amostrados ao longo da normal da superfície. O valor de *threshold* é definido como sendo o ponto onde o máximo gradiente dos níveis de cinza é detectado em uma determinada região da peça.

Cada etapa da cadeia de medição influencia significativamente o resultado de medição por metro-TC. Dentre as fontes de influência mais significativas na etapa de aquisição da imagem estão as alterações na geometria do equipamento causadas por gradientes térmicos. Essa problemática será tratada nas seções a seguir.

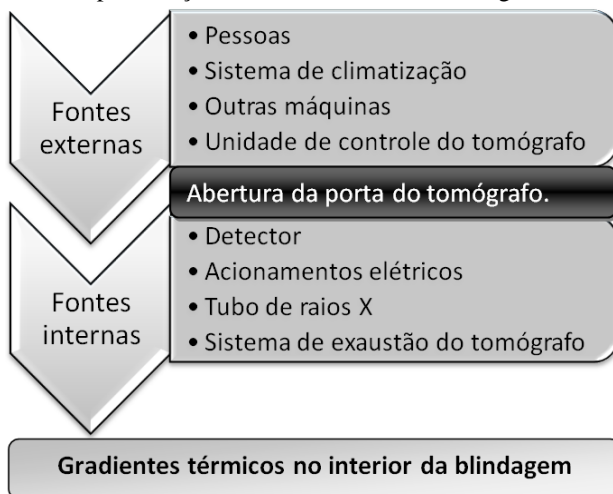
2.2 CAUSAS DE GRADIENTES TÉRMICOS EM METRO-TC

Gradientes térmicos são variações de temperatura no tempo (gradientes temporais) ou no espaço (gradientes espaciais). Esses gradientes são originados a partir de diversas fontes de perturbação térmica. Oito

² Termo em inglês amplamente utilizado referente ao processo de extração de superfície.

potenciais fontes são apresentadas na Figura 3, sendo classificadas em internas e externas à blindagem da máquina. Especialmente críticas são as fontes internas, que estão confinadas no interior da blindagem do equipamento [2].

Figura 3 - Fontes de perturbação térmica na câmara do tomógrafo

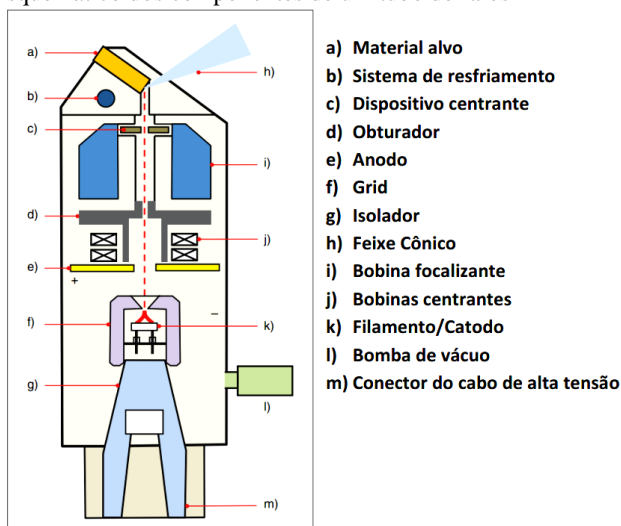


O tubo de raios X é a fonte térmica mais significativa do equipamento. O aquecimento ocorre principalmente devido ao processo de geração da radiação. A radiação é resultado da colisão de um feixe de elétrons com o alvo do tubo. Essa colisão ocorre em uma pequena área do alvo, sendo essa área conhecida como ponto focal. A eficiência desse processo é bastante baixa. Kruth et al. [2] afirmam que menos de 1% da energia fornecida para a fonte de raios X é transformada em fótons de radiação, sendo a parte remanescente transformada em calor.

De um ponto de vista metrológico, pontos focais pequenos são desejáveis, já que possibilitam uma maior nitidez das transições ar-material na imagem tomográfica e, conseqüentemente, uma melhor incerteza no processo de extração da superfície. No entanto, essa condição leva a uma maior concentração de calor no material alvo do tubo [14][18].

O aquecimento do tubo é a principal causa da deriva do ponto focal durante uma medição por metro-TC [17][33]. Além disso, para aumentar a potência do tubo, sem desgastar prematuramente o material alvo, fabricantes desenvolveram sistemas de resfriamento da fonte estrategicamente posicionados próximo ao alvo (Figura 4) [2].

Figura 4 - Esquemático dos componentes de um tubo de raios X



Fonte: Adaptado de [23]

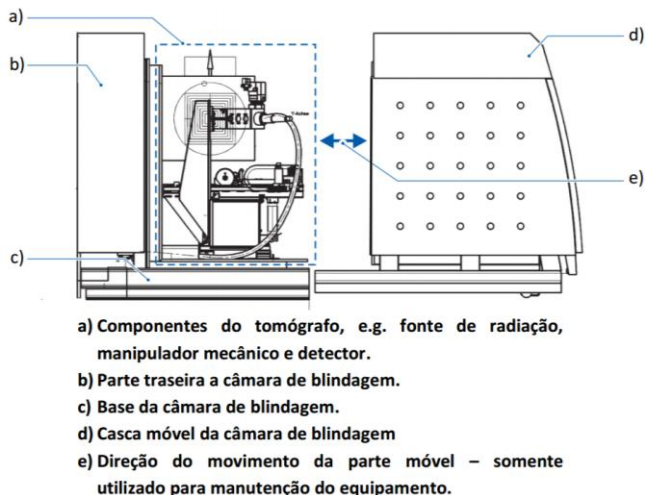
Quatro acionamentos elétricos são encontrados no sistema de manipulação mecânica do tomógrafo e também contribuem para a ocorrência de gradientes térmicos na câmara. A função básica dos acionamentos é movimentar o sistema de manipulação para posicionar e rotacionar a peça durante o processo de varredura. Por se tratar de um componente gerador de calor e estar próximo à base estrutural do manipulador, o aquecimento gerado por esses acionamentos, além de perturbar a temperatura do ambiente de aquisição das projeções, pode gerar um aquecimento localizado na base estrutural do sistema, podendo causar diferenças térmicas ao longo da estrutura e distorções no manipulador.

O painel de detecção é uma terceira fonte térmica confinada no interior da blindagem do sistema. O aquecimento ocorre devido à interação da radiação com os elementos sensíveis bem como, nos componentes eletrônicos presentes no detector para tratamento do sinal. Cada elemento sensível pode deformar de forma distinta, podendo causar distorções do painel de detecção.

Além das fontes de perturbação confinadas na blindagem do tomógrafo, fontes externas afetam o ambiente de medição (Figura 3). Embora a blindagem do tomógrafo (Figura 5) seja um importante isolante da radiação e térmico, as fontes externas (i.e. sistema de climatização, pessoas, outras máquinas e unidade de controle do tomógrafo) perturbam o

ambiente de aquisição de imagens nos momentos de abertura e fechamento da porta do equipamento para posicionamento da peça na mesa rotativa.

Figura 5 - Câmara de blindagem do tomógrafo Carl Zeiss METROTOM 1500



Fonte: Adaptado de [34].

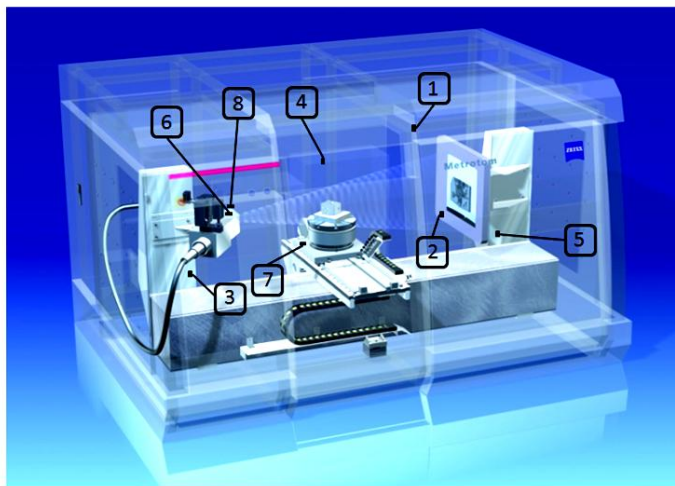
2.2.1 Experimento preliminar

Um experimento preliminar foi realizado com o objetivo de quantificar os gradientes térmicos no interior da blindagem do equipamento utilizado nesse trabalho de pesquisa, durante um processo típico de aquisição de imagem. Oito sensores de temperatura (Pt-100) foram distribuídos estrategicamente no interior da cabine do tomógrafo (Figura 6), o tomógrafo utilizado no experimento foi um Carl Zeiss METROTOM 1500, instalado nas dependências da Fundação CERTI (LAELECTRON).

O resultado da medição de temperatura durante dois processos de aquisição de imagem é apresentado na Figura 7. A primeira aquisição da imagem ocorre até o tempo 103 min, quando o tubo é desligado. Nesse instante a temperatura próxima ao tubo de raios X começa a diminuir. Logo depois, pode ser observado que a porta do tomógrafo é aberta para troca de peça. Essa é a causa da variação da temperatura detectada pelo sensor do centro da cabine. Posteriormente, em 137 min uma nova medição é iniciada e finalizada em 150 min.

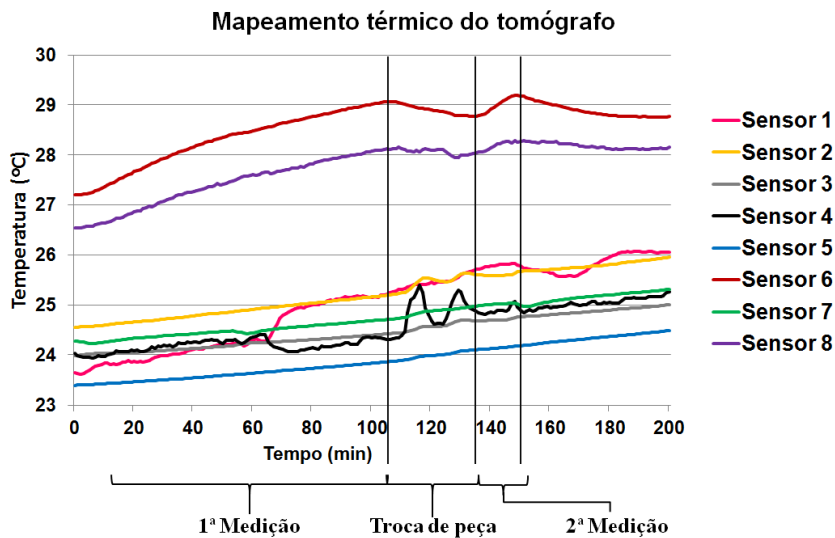
Figura 6 - Disposição dos sensores de temperatura (Pt-100) no interior e exterior da câmara de metro-TC

- | | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 – Ambiente (fora da cabine) | 5 – Colado (estrutura detector) |
| 2 – Colado (detector) | 6 – Colado (tubo) |
| 3 – Colado (estrutura da fonte) | 7 – Colado (mesa) |
| 4 – Ambiente (centro da cabine) | 8 – Ambiente (próximo ao 6) |



Fonte: Adaptado de [35]

Figura 7 - Mapeamento térmico durante o processo de aquisição das projeções por metro-TC



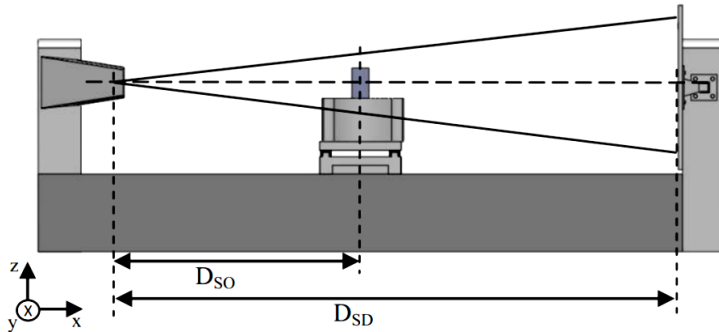
2.3 EFEITOS DOS GRADIENTES TÉRMICOS EM METRO-TC

Alterações na geometria do tomógrafo (Figura 1) ocorrem devido à presença de gradientes térmicos no interior da blindagem do sistema tomográfico. Essas mudanças na geometria do sistema são de difícil quantificação e levam a distorções no volume reconstruído [36]. Os principais erros de geometria do sistema são: deriva do ponto focal, distorções no suporte do tubo de raios X, distorções no manipulador mecânico e distorções no detector. Esses erros serão detalhados a seguir.

2.3.1 Distorções no manipulador mecânico

O algoritmo de reconstrução das imagens tem como pressuposto que os componentes estão perfeitamente alinhados. Isso somente é válido com o atendimento de duas condições básicas: o eixo que passa pelo ponto focal e centro do detector deve ser ortogonal ao plano do detector e o eixo de rotação da mesa rotativa e a coluna central de elementos sensíveis do detector devem ser paralelos (Figura 8) [13][36][37].

Figura 8 - Vista frontal da geometria do tomógrafo



O manipulador mecânico é responsável pelo posicionamento e rotação do objeto durante a aquisição das projeções. Distorções no manipulador causadas por gradientes térmicos causam deslocamentos e inclinações do eixo da mesa rotativa (Figura 9), resultando em indefinições das bordas na imagem volumétrica (Figura 10). Aspectos construtivos associados à estabilidade térmica e a verificação periódica da geometria do sistema tentam limitar a influência dos desalinhamentos dos componentes do manipulador mecânico [38][39].

Figura 9 - Efeito do deslocamento do eixo da mesa rotativa na projeção

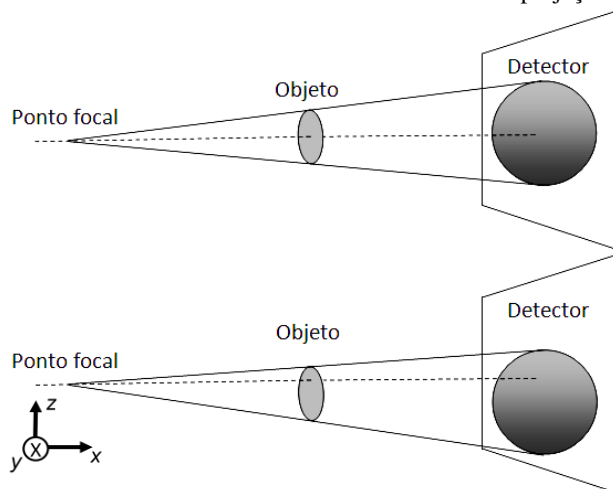
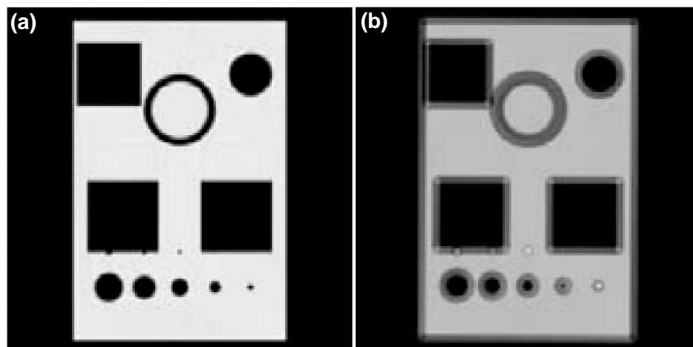


Figura 10 - Efeito na imagem reconstruída sem (a) e com (b) deslocamento do manipulador mecânico



Fonte: Adaptado de [13]

Welkenhuyzen et al. [18] apresentam uma classificação dos fatores de influência em TC industrial baseado nos componentes do sistema. Como estratégia de melhoria, os autores sugerem que sejam adotadas técnicas construtivas utilizadas em máquinas de medir por coordenadas (MMCs), visando estabilidade térmica da máquina. Outra melhoria relacionada à geometria do sistema é o uso de padrões de referência para verificar a geometria da máquina, reduzir os erros de medição e garantir a rastreabilidade dos resultados das medições [18].

Andreu et al. [38] classificam e analisam experimentalmente diversas fontes de erros presentes no tomógrafo. Os autores afirmam que os erros causados pelo sistema de manipulação têm especial importância na medição, e que o uso de materiais adequados na estrutura minimiza a influência de gradientes térmicos no resultado final [38].

O uso de objetos com dimensões e geometria conhecida é o método mais utilizado para determinar e ajustar os parâmetros geométricos de um sistema de metro-TC [34].

Diversos são os estudos no desenvolvimento de métodos e padrões para verificação da geometria do sistema de metro-TC [40][41][42][43][44]. A eficácia desses métodos é, no entanto, limitada quando há diferença de temperatura entre o momento da verificação da geometria e o momento da medição da amostra.

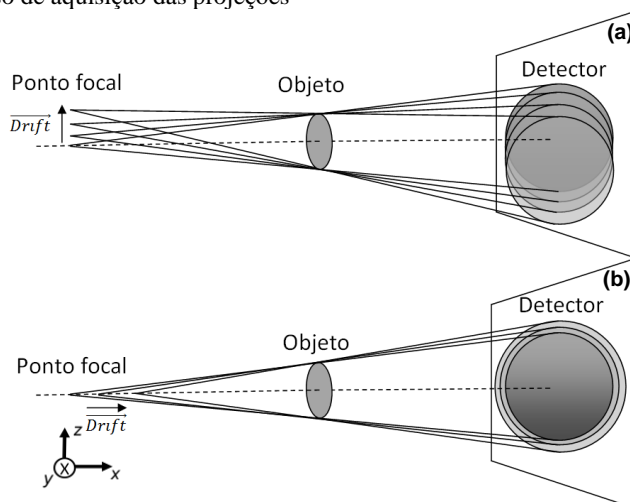
2.3.2 Deriva do ponto focal

Durante o processo de aquisição das projeções, variações de posição, tamanho e forma do ponto focal ocorrem devido ao aquecimento do tubo. O deslocamento do ponto focal devido a causas térmicas é chamado de deriva térmica do ponto focal.

A deriva térmica do ponto focal, durante o processo de aquisição das imagens, pode ocorrer tanto paralela quanto perpendicular ao plano do detector [36][38], e causa um deslocamento gradativo nas projeções. O deslocamento do ponto focal paralelo à superfície do detector, Figura 11 (a), cria bordas duplas na reconstrução. Esse efeito compromete a exatidão da extração da superfície, gerando principalmente desvios de forma dos elementos extraídos. O movimento do ponto focal perpendicular ao plano do detector, Figura 11 (b), gera um erro de escala na imagem reconstruída, gerando erros de medição de características dimensionais do objeto (e.g. diâmetro, comprimento, posição, etc.) [16][45].

Em tubos reflexivos, o efeito do deslocamento da fonte na direção paralela ao plano do detector (deriva do ponto focal no plano y-z) é favorecido, devido à inclinação do material alvo no tubo de raios X em relação ao feixe de elétrons (Figura 4) [14][46]. O material alvo do tubo é inclinado em relação ao feixe de incidência dos elétrons, qualquer alteração de temperatura no material alvo ocasionará em uma expansão ou contração do material alvo. Tanto expansão quanto contração, o feixe de elétrons deslocará lateralmente, gerando o efeito de deslocamento do ponto focal na direção paralela ao plano do detector.

Figura 11 - Efeito do deslocamento gradativo do ponto focal na projeção ao longo do processo de aquisição das projeções



Visando quantificar as variações de posição do ponto focal durante o processo de aquisição das projeções, Vogeler et al. [15] propõem um método para determinar a estabilidade posicional do sistema baseado nas projeções. Os estudos experimentais documentados nesse trabalho apontam principalmente para um deslocamento das projeções na vertical (eixo z). Esse deslocamento pode ser explicado devido ao aquecimento do tubo durante o processo de aquisição das projeções e à orientação do tubo de raios X no sistema de metro-TC. Além disso, uma implementação prática da correção da deriva foi realizada, baseada em medições de duas esferas estacionárias juntamente com a peça a ser rotacionada e avaliada. A análise da correção foi realizada baseada na comparação de mapa de cores dos dados obtidos a partir das reconstruções com e sem correção. Constatou-se que esses resultados eram divergentes. Não foi possível, no entanto, verificar se a correção implementada teve de fato um impacto positivo, uma vez que os parâmetros de calibração não foram citados [15].

Hiller et al. [45] apresentam uma forma de caracterização física do tubo de raios X. O movimento do ponto focal foi determinado baseado no deslocamento nas projeções de uma esfera com diâmetro de 0,85 mm. A deriva do ponto focal absoluta foi obtida através da diferença entre as coordenadas do centro da circunferência extraída em cada projeção em relação às coordenadas do centro da primeira projeção. Baseado no método de caracterização do movimento do ponto focal, os autores sugerem

compensar a deriva utilizando a informação obtida diretamente no algoritmo de reconstrução. Segundo os autores, o método de compensação da deriva do ponto focal leva a uma melhora do resultado, porém, por falta de informações não foi possível obter valores quantitativos e concluir se a melhora é consistente [45].

2.3.3 Distorções no detector

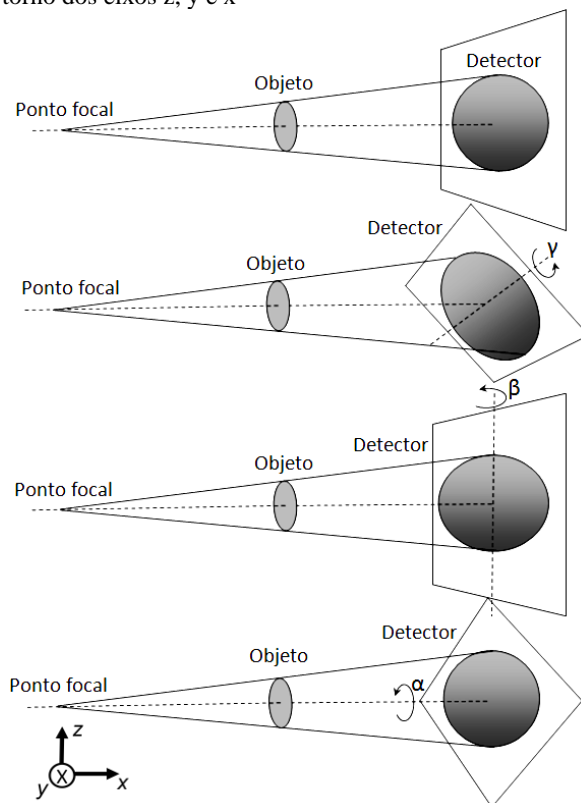
O conhecimento a respeito da posição e da inclinação do detector é necessário, uma vez que a reconstrução da imagem volumétrica é baseada na informação fornecida pelo detector. A ocorrência de qualquer não idealidade na geometria do painel de detecção afeta diretamente a qualidade da reconstrução da imagem. Erros de inclinação e translação do painel de detecção ocorrem principalmente devido a variações térmicas no interior da blindagem.

Efeitos semelhantes aos efeitos de deriva do ponto focal podem ser observados quando há translação do detector. No entanto, inclinações do detector causam diferentes efeitos na imagem. Inclinações em torno dos eixos y e z no detector (ângulos γ e β) geram alterações de escala não uniformes nas projeções (Figura 12) e causam bordas duplas na imagem volumétrica. Inclinações do detector em α (em torno do eixo x , ilustrado na Figura 12) produzem distorções geométricas no volume reconstruído [47].

Vidal-Migallon et al. [47] perceberam por simulação que a inclinação em α (Figura 13) e a translação paralela ao plano y - z são as alterações de geometria que introduzem os erros mais significativos em relação à distorções do painel de detecção [47].

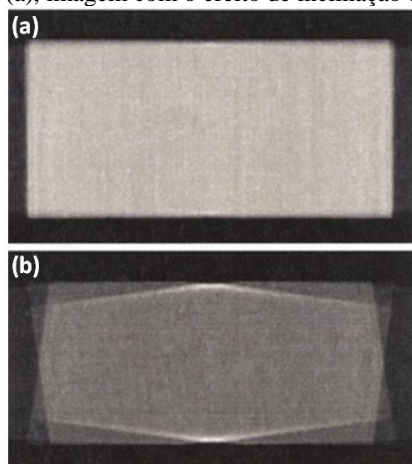
Kumar et al. [36] apresentam um estudo experimental a respeito da influência dos desalinhamentos geométricos dos componentes do sistema, com intuito de verificar o impacto das diferentes orientações do objeto na qualidade da medição. O objeto utilizado foi uma barra cilíndrica com duas esferas fixadas em suas extremidades. Os experimentos foram realizados em três orientações do objeto: vertical, horizontal e inclinado. Para orientações na vertical e horizontal do objeto, os resultados evidenciaram que a medição é fortemente influenciada pelas inclinações em β ou γ do detector [36].

Figura 12 - Efeito na imagem de projeção causado pela inclinação do painel de detecção em torno dos eixos z, y e x



Utilizando ferramentas de simulação, Wenig e Kasperl [37] investigaram sistematicamente a dependência das fontes de influências na qualidade da medição. Os resultados apontam para a inclinação do detector em torno do eixo x (ângulo α) e para o movimento do manipulador mecânico na direção do eixo y como sendo as distorções na geometria mais críticas [37].

Figura 13 - Efeito da inclinação do detector α na imagem volumétrica, imagem sem o efeito de inclinação (a), imagem com o efeito de inclinação em α (b)



Fonte: Adaptado de [47]

2.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Além das várias fontes de influência em cada etapa da cadeia de medição por metro-TC, diversos são os possíveis erros na geometria do sistema causados por gradientes térmicos. Especialmente significativos, são as fontes de influências presentes na etapa de aquisição das imagens, tendo a qualidade da imagem volumétrica elevada dependência desses erros.

As principais causas de gradientes térmicos ocorrem a partir de diversas fontes de perturbação térmicas confinadas no interior da blindagem da máquina. Dentre essas, o tubo de raios X se caracteriza como a principal fonte, devido sua elevada temperatura durante o processo de aquisição de imagens. Esse aquecimento ocorre principalmente devido ao processo de geração da radiação X.

Alterações na geometria do tomógrafo ocorrem com a presença de gradientes térmicos no interior da blindagem da máquina. Essas mudanças levam a distorções no processo de aquisição de imagens e, consequentemente, no volume reconstruído. Os principais erros de geometria do sistema são: deriva do ponto focal, distorções no suporte do tubo de raios X e distorções no manipulador mecânico.

Esforços no sentido de melhorar a caracterização da geometria têm sido realizados por fabricantes e pesquisadores. Porém, escassos são os esforços no sentido da investigação e correção dos erros geométricos causados por gradientes térmicos.

3 PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVOS

Este capítulo é dedicado ao detalhamento do problema e os objetivos do trabalho.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O recente crescimento da TC em metrologia industrial e científica tem impulsionado diversos desenvolvimentos na tecnologia. Parte dos avanços foi dedicada à melhoria da qualidade da fonte de raios X, como a redução do tamanho do ponto focal e aumento da potência da fonte. A redução do tamanho do ponto focal permite melhorar a nitidez da transição ar-material na imagem volumétrica, enquanto o aumento da potência permite uma maior capacidade de penetração dos raios X. No entanto, essa condição leva a um aumento na temperatura da fonte durante o processo de geração da radiação.

Pesquisas recentes apontam que a ocorrência de deriva térmica em sistemas de metro-TC afeta a qualidade das imagens de projeções [15][17][45][46]. Desalinhamentos e distorções na geometria do sistema são apresentados como um dos maiores deterioradores das projeções e são causados principalmente por transientes térmicos ocorrentes durante o processo de aquisição das projeções [16][45]. Essas não idealidades são caracterizadas pelo deslocamento do ponto focal no tubo de raios X, inclinação e translação do painel de detecção e desalinhamentos no sistema de manipulação mecânica. As mudanças de geometrias durante a medição causam distorções e erros de escala na imagem reconstruída, podendo invalidar os resultados de medição obtidos, dependendo da magnitude do erro ocorrido.

Atualmente, o método mais utilizado para minimizar os erros de geometria do sistema é baseado na verificação geométrica da máquina com o uso de padrões materializados [40][41][42]. No entanto, os desalinhamentos e deslocamentos da geometria do sistema relacionados a gradientes térmicos temporais ocorrem durante o processo de aquisição das projeções e não são compensados através da verificação geométrica.

Diversos são os estudos relacionados às influências dos parâmetros de configuração da máquina. Porém, escasso é o número de publicações a respeito de efeitos térmicos no sistema de metro-TC. Há, portanto, necessidade da realização de um estudo experimental para quantificação e minimização dos efeitos de transientes térmicos. O presente trabalho almeja contribuir nesse aspecto, buscando respostas às seguintes perguntas:

- ✓ Os gradientes temporais no interior da cabine de um sistema de metro-TC geram deriva significativa das projeções em um processo típico de aquisição de imagem?
- ✓ Se sim, a deriva das projeções causa distorções geométricas significativas no volume reconstruído?
- ✓ Essas distorções podem ser reduzidas através de um método de correção baseado na manipulação matemática das projeções?

3.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

3.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é a análise detalhada e a compensação dos efeitos de deriva térmica na qualidade do resultado da medição por metro-TC, buscando melhorar a exatidão das medições realizadas por metro-TC.

3.2.2 Objetivos específicos

- Quantificar as influências de deriva térmica em medições geométricas por metro-TC;
- Desenvolver um método de compensação dos efeitos de deriva térmica;
- Avaliar o método de compensação proposto, por meio de medições geométricas por metro-TC e comparação com outras abordagens.

4 INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DE DERIVA TÉRMICA EM MEDIÇÕES GEOMÉTRICAS POR METRO-TC

Este capítulo apresenta um estudo numérico-experimental realizado com o objetivo de determinar a magnitude e a natureza dos erros de medição causados por deriva térmica. A investigação foi focada no deslocamento relativo entre os componentes do tomógrafo, causado por gradientes térmicos temporais e espaciais durante o processo de aquisição das projeções por metro-TC. Para investigar o deslocamento relativo entre os componentes da máquina, diversas medições utilizando uma esfera de precisão calibrada e ferramentas computacionais foram feitas. Adicionalmente, visando caracterizar a natureza do fenômeno, uma análise por simulação foi realizada. Objetivando verificar a validade geral das conclusões obtidas através dos estudos realizados com a geometria esférica, foram analisadas peças complementares com geometrias diversas.

4.1 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Os experimentos descritos nas seções seguintes foram realizados em dois sistemas tomográficos do fabricante Carl Zeiss modelo METROTOM 1500, equipados com tubos de raios X de 225 keV^[3] e detectores configurados com (1024 x 1024) pixels. Os sistemas são de versões diferentes e estão instalados no Laboratório de Máquinas-Ferramenta (WZL) na Universidade Técnica de Aachen (RWTH/Aachen), Alemanha (sistema TC_A), e no laboratório de metrologia compartilhado entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Fundação CERTI em Florianópolis (sistema TC_B).

Os critérios aplicados para seleção do objeto usado no estudo experimental foram: geometria simples e bem definida, baixo coeficiente de expansão térmica e coeficiente de atenuação adequado para a tarefa. Um apalpador (utilizado em MMC tátil) em nitreto de silício, com diâmetro de 8 mm e haste em fibra de carbono foi selecionado. O nitreto de silício (Si_3N_4) possui coeficiente de expansão térmica de aproximadamente $3,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ e densidade de aproximadamente $3,1 \text{ g/cm}^3$, enquanto a haste de fibra de carbono possui coeficiente de expansão térmica de aproximadamente $-0,4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [49].

³ elétron-volt não é uma unidade pertencente ao SI, mas é convenientemente utilizada, pois é caracterizada como a energia cinética adquirida por um elétron ao passar pela diferença de potencial de um volt no vácuo [48].

O desvio de circularidade foi calibrado pela extração da linha circunferencial no plano equatorial da esfera (perpendicular ao eixo da haste) utilizando uma máquina de medição de forma tátil com um apalpador esférico (\varnothing 3 mm). A linha extraída foi filtrada pelo método Gaussiano utilizando frequência de corte de 15 OPR (ondas por revolução). O círculo de referência foi calculado pelo critério de mínimos quadrados. O valor de desvio de circularidade pico-vale (RONT) obtido na calibração foi menor que 0,1 μ m, considerando a incerteza do sistema de medição.

Para medições nos sistemas de metro-TC, o objeto teste foi fixado no centro da mesa rotativa (Figura 14). A mesa rotativa foi posicionada o mais próximo possível do tubo de raios X, resultando em um fator de ampliação de $m = 13,6$. A configuração dos parâmetros utilizados nos experimentos é apresentada na Tabela 1. O tempo de varredura foi de aproximadamente 60 min para cada ciclo de aquisição.

Figura 14 - Fixação da esfera na mesa rotativa do tomógrafo

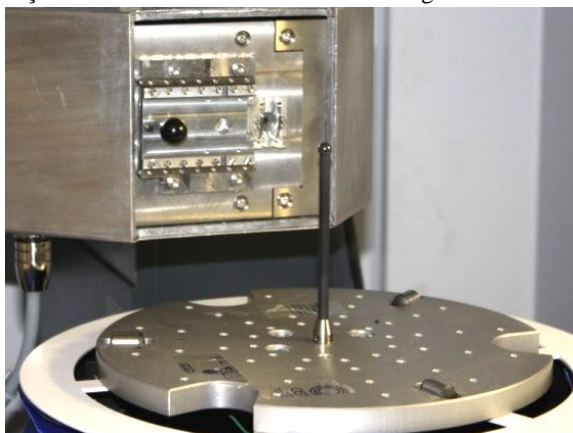


Tabela 1 - TC Parâmetros de configuração do metro-TC para medição do apalpador

Tensão $U[kV]$	Corrente $I[\mu A]$	Tempo de integração $B[ms]$	Ganho $E[vezes]$	Pré-filtro $V[mm]$	Projeções P
180	180	2000	16	0	800

Onde:

- Tensão – é a diferença de potencial entre o anodo e o catodo do tubo. É o parâmetro que influencia a faixa do espectro de raios X definindo o maior valor energético possível para os fótons emitidos [50].
- Corrente – determina a intensidade do feixe [50].
- Tempo de integração – é o tempo de integração do detector - equivale o tempo de exposição de uma câmera fotográfica - quanto maior o tempo de integração maior é o brilho [34].
- Ganho – é o ganho do fotodiodo do detector e tem efeito no sinal da imagem. O ajuste do valor do ganho deve ser o menor possível, aumentando apenas se o valor da corrente do tubo e o ajuste do tempo de integração não melhorar a intensidade da imagem [34][50].
- Pré-filtro – é o pré-filtro do feixe, são chapas de cobre ou alumínio posicionadas na saída do feixe de raios X no tubo. Reduzem o espectro energético eliminando os fótons de menor energia [50].
- Projeções – é o número de imagens adquiridas em uma revolução [50].

4.2 ANÁLISE DA RESPOSTA DO TRANSIENTE DO SISTEMA DE METRO-TC

Para realizar a análise do comportamento do transiente térmico, dois ciclos consecutivos de varredura com o mesmo número de projeções foram feitos. Com essa abordagem, esperava-se excluir da análise alguns desvios sistemáticos tais como a excentricidade e o cambaleamento do eixo da mesa rotativa.

A deriva em cada projeção foi avaliada pela determinação da posição das coordenadas do centro da esfera, no plano do detector (plano y-z). Em cada projeção, os pixels correspondentes à borda da esfera são extraídos com o algoritmo de detecção de bordas de Canny [30]. Posteriormente, um círculo é ajustado por interpolação de mínimos quadrados nos pixels correspondentes à borda, e as coordenadas do centro são obtidas (Figura 15). O vetor diferença entre o centro do círculo da i-ésima projeção da segunda varredura e o centro do círculo da projeção correspondente na primeira varredura corresponde à deriva da i-ésima projeção (Eq. 1).

$$\overrightarrow{Drift_i} = \overrightarrow{C_{i,2}} - \overrightarrow{C_{i,1}} \quad (\text{Eq. 1})$$

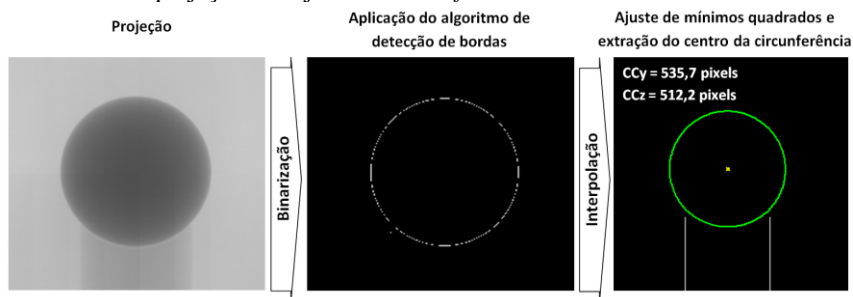
Onde:

$\overrightarrow{Drift_i}$: deriva da i-ésima projeção em y e z

$\overrightarrow{C_{i,1}}$: coordenadas do centro da circunferência da i-ésima projeção para a primeira varredura

$\overrightarrow{C_{i,2}}$: coordenadas do centro da circunferência da i-ésima projeção para a segunda varredura

Figura 15 - Processo de extração das coordenadas do centro da circunferência obtida em cada projeção do objeto teste no *software* MATLAB®



A análise descrita foi aplicada em ambos os tomógrafos TC_A e TC_B. O ambiente onde se encontrava o tomógrafo TC_A possuía condições ambientais controladas. As medições foram realizadas com temperatura ambiente especificada para o laboratório de $(20,0 \pm 3,0)^\circ\text{C}$. Entretanto, o ambiente onde se encontrava o tomógrafo TC_B não possuía condições ambientais controladas. Uma estimativa foi realizada e a temperatura ambiente foi de $(23,0 \pm 8,0)^\circ\text{C}$.

A resposta dos sistemas em relação à deriva nas projeções está apresentada nas Figuras 16 e 17. A primeira apresenta o comportamento observado no sistema TC_A. Uma significativa diferença entre a deriva no eixo z (vertical) e eixo y (horizontal) é evidente. Essa diferença pode ser explicada pelo ângulo do alvo no tubo de raios X, que favorece o deslocamento do ponto focal na direção horizontal (Figura 4).

Figura 16 - Deslocamento nas projeções causado por derivas térmicas no sistema tomográfico TC_A

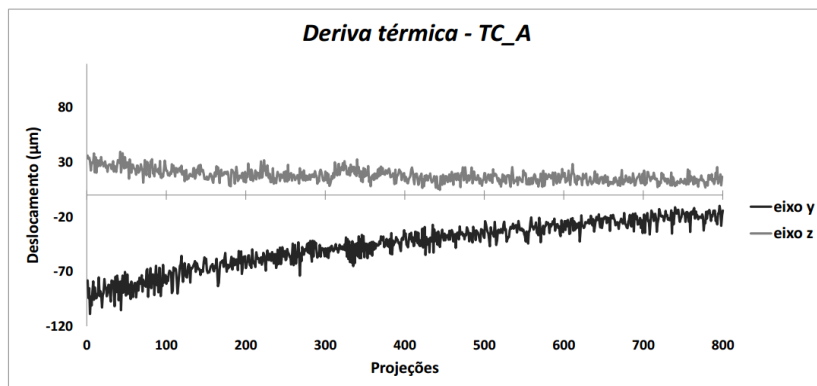
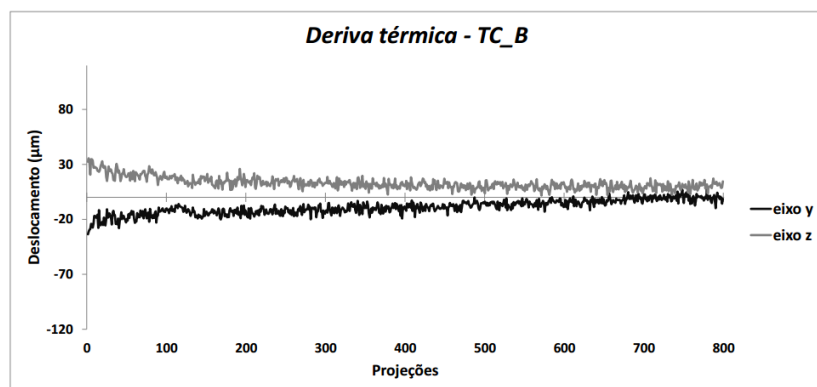


Figura 17 - Deslocamento nas projeções causado por derivas térmicas no sistema tomográfico TC_B



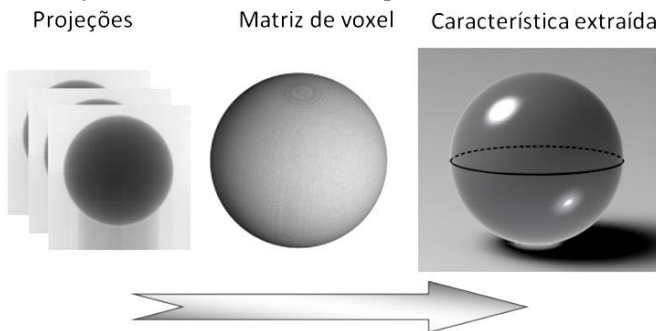
Uma diferença expressiva é observada entre as curvas de resposta do eixo y nos sistemas. O sistema TC_A apresenta uma deriva no eixo horizontal ao detector aproximadamente 5 vezes maior que o sistema TC_B, para o conjunto de projeções apresentado. Essa diferença pode ser atribuída aos novos conceitos do sistema de exaustão da câmera de blindagem e do sistema de arrefecimento do tubo de raios X implantados no sistema TC_B, que é um equipamento mais recente. Além disso, é possível observar nos dois equipamentos que a deriva decresce nos últimos pares de projeções (as curvas se aproximam do zero no eixo do deslocamento), indicando estabilização térmica em ambos os sistemas.

4.3 INFLUÊNCIA DA DERIVA TÉRMICA EM MEDIÇÕES GEOMÉTRICAS POR METRO-TC

A fim de avaliar o impacto da deriva térmica em medições geométricas por metro-TC, a reconstrução da esfera foi realizada a partir das projeções derivadas da primeira varredura em ambos os sistemas tomográficos investigados. Uma linha circunferencial no equador da esfera (perpendicular ao plano do detector) foi extraída a partir volume reconstruído (Figura 18). A extração da linha foi realizada como descrita nos seguintes passos:

- I. Aquisição das projeções;
- II. Reconstrução da imagem volumétrica, utilizando algoritmo baseado no método de retro projeção filtrada;
- III. Determinação da superfície, utilizando um algoritmo de segmentação local (*threshold local*);
- IV. Ajuste de uma esfera, utilizando o método dos mínimos quadrados;
- V. Alinhamento básico da esfera;
- VI. Ajuste da circunferência no equador da esfera, utilizando o método de mínimos quadrados;
- VII. Extração dos pontos sobre o plano do equador da esfera ajustada.

Figura 18 - Extração da linha circunferencial a partir do volume reconstruído



Para analisar a linha circunferencial extraída, uma abordagem gráfica foi adotada [26][51]. As representações nos domínios do espaço e da frequência das linhas circunferenciais extraídas a partir da reconstrução do sistema TC_A e do sistema TC_B estão ilustradas nas Figuras 19 e 20, respectivamente.

Figura 19 - Representações polar (linha azul: representação espacial da linha extraída a partir dos dados tomográficos, linha vermelha: representação da circunferência ajustada) e de conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída a partir da esfera reconstruída do sistema TC_A

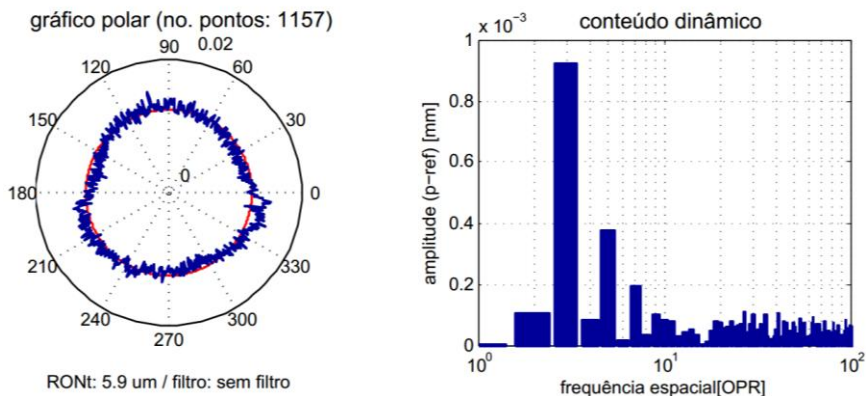
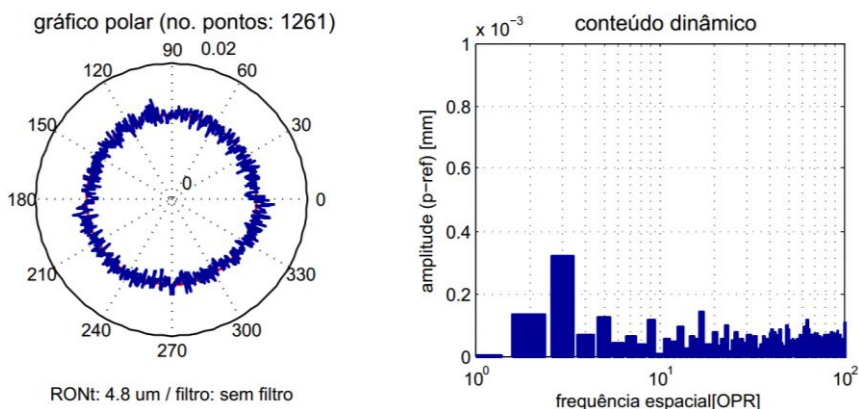


Figura 20 - Representações polar (linha azul: representação espacial da linha extraída a partir dos dados tomográficos, linha vermelha: representação da circunferência ajustada) e de conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída a partir da esfera reconstruída do sistema TC_B



A visualização dos gráficos polares permite observar uma descontinuidade dos perfis no eixo 0° - 180° (eixo y do sistema de metro-TC), representados nas Figuras 19 e 20. A descontinuidade no perfil é mais evidente no TC_A, devido à sua característica proeminente em relação ao comportamento da deriva. Além disso, o efeito de deriva térmica produz harmônicas dominantes ímpares, nas frequências espaciais de (3, 5, 7 e

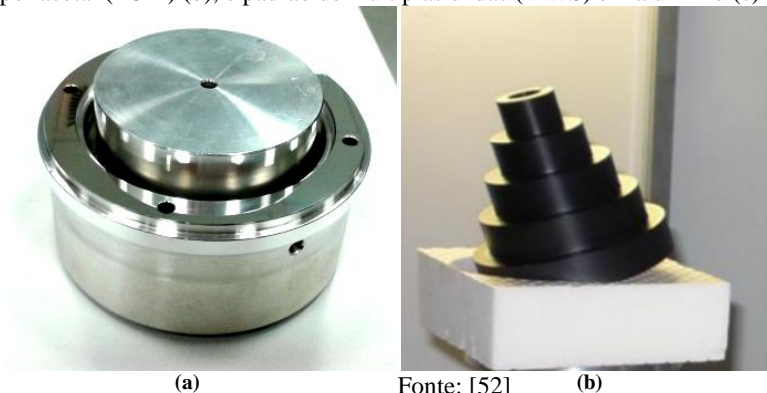
9) OPR, como pode ser visto nos gráficos de conteúdo dinâmico ilustrados na parte direita das Figuras 19 e 20.

4.4 INFLUÊNCIA DA DERIVA EM OBJETOS DIVERSOS

Visando independência do efeito de deriva térmica da geometria do objeto de medição, uma análise de circularidade a partir de dados obtidos por metro-TC de três peças adicionais foi realizada. Um artefato calibrado em alumínio, Figura 21 (a), um *step cylinder* em poliacetal (POM), Figura 21 (b), e um padrão de múltiplas ondas^[4] (MWS) em alumínio foram escolhidos para análise, Figura 21 (c).

A análise foi realizada a partir da extração de uma linha circunferencial a 5,5 mm do plano superior de referência do artefato calibrado com diâmetro nominal de 90 mm, a 26 mm do plano superior de referência do *step cylinder*, com diâmetro nominal de 42 mm, e na linha circunferencial média no cilindro das ondas projetadas no MWS com diâmetro nominal de 40 mm. Uma abordagem gráfica foi adotada. Os gráficos polares e de conteúdo dinâmico dos perfis extraídos a partir dos dados reconstruídos por TC foram plotados e estão ilustrados nas Figuras 22, 23 e 24.

Figura 21 - Peças tomografadas, artefato calibrado em alumínio (a), *step cylinder* em poliacetal (POM) (b), e padrão de múltiplas ondas (MWS) em alumínio (c)



Fonte: [52]

⁴ Tradução do inglês para "*multi-wave standard*".



Fonte: [53] (c)

O efeito de descontinuidade também é observado no gráfico polar do *step cylinder* (Figura 23). Porém, outras componentes causadas pelo ruído do processo de medição e características da peça são combinadas com as harmônicas observadas no efeito de deriva térmica.

Figura 22 - Representações polar (linha azul: representação espacial do perfil filtrado extraído a partir dos dados tomográficos, linha vermelha: representação da circunferência ajustada) e de conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída a partir de um artefato calibrado com diâmetro nominal de 90 mm

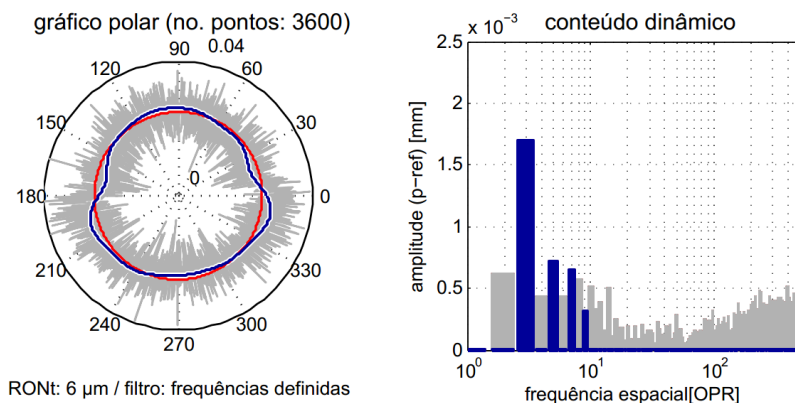
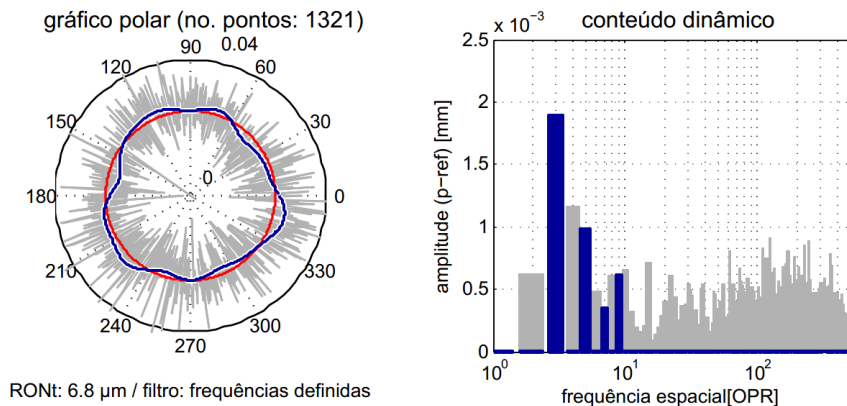
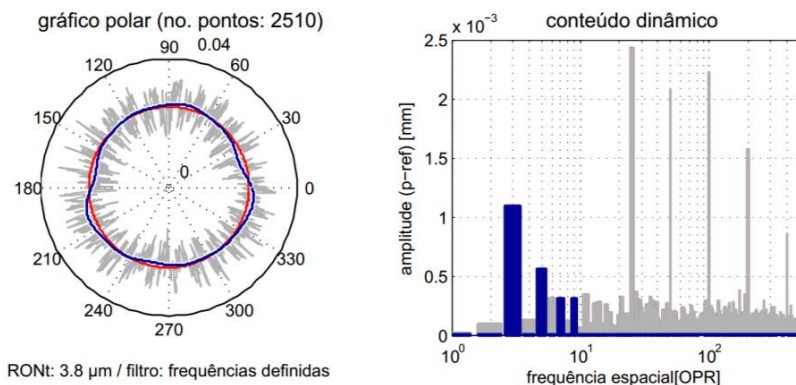


Figura 23 - Representações polar (linha azul: representação espacial do perfil filtrado extraído a partir dos dados tomográficos, linha vermelha: representação da circunferência ajustada) e de conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída a partir de um *step cylinder* com diâmetro nominal de 42 mm



O padrão de múltiplas ondas foi projetado e desenvolvido especificamente para avaliação da resposta em frequência do tomógrafo [52]. A configuração especificada das frequências espaciais foi de (25, 50, 100, 200 e 400) OPR e as amplitudes (2,5 μm) do padrão de múltiplas ondas. As componentes projetadas são prontamente caracterizadas na análise do conteúdo dinâmico do perfil. Porém, o perfil medido pelo tomógrafo apresenta atenuação das amplitudes nas componentes de frequências especificadas. Além disso, a predominância das harmônicas ímpares, de (3, 5, 7 e 9) OPR e a descontinuidade no eixo 0°-180° (gráfico polar), ambas causadas pela deriva térmica, também podem ser observadas nas representações polar e conteúdo dinâmico da avaliação da linha circunferencial obtida a partir do MWS (Figura 24).

Figura 24 - Representações polar (linha azul: representação espacial do perfil filtrado extraído a partir dos dados tomográficos, linha vermelha: representação da circunferência ajustada) e conteúdo dinâmico da linha circunferencial extraída a partir de um MWS com ondas projetadas nas componentes de (25, 50, 100, 200 e 400) OPR.



Resumidamente, uma avaliação geométrica foi realizada para caracterizar o efeito do transiente térmico. É possível constatar a presença do efeito em ambos os sistemas tomográficos. A verificação da independência do efeito observado da geometria da peça foi realizada a partir dos dados obtidos por TC de três peças adicionais. É notável a semelhança do efeito de deriva térmica (descontinuidade do perfil nos gráficos polares no eixo 0° - 180° e a predominância das harmônicas ímpares nos gráficos de conteúdo dinâmico) entres os resultados obtidos da esfera calibrada e as peças adicionais.

4.5 ANÁLISE POR SIMULAÇÃO

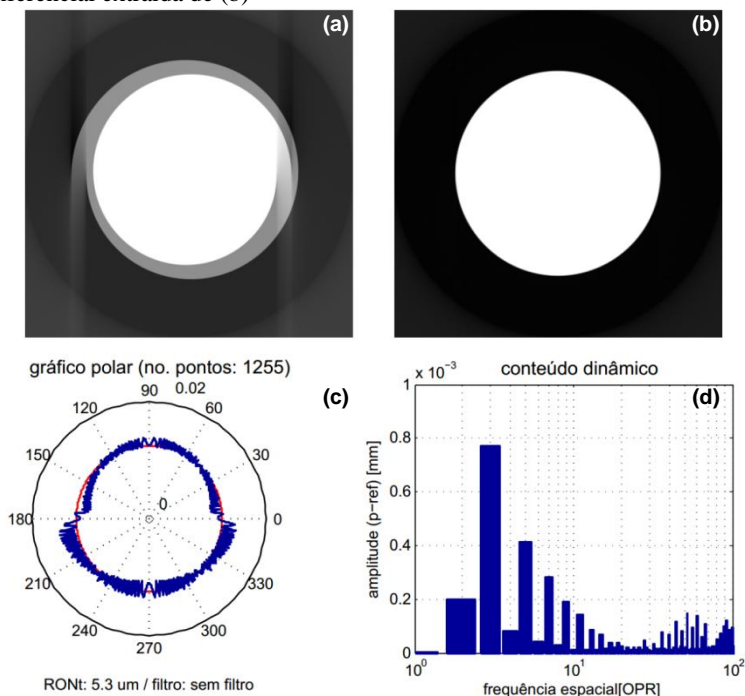
Adicionalmente à investigação experimental descrita acima, um estudo de simulação foi realizado, o qual utiliza um algoritmo de intersecção de polígonos para aquisição dos dados, um algoritmo baseado no método de retro projeção filtrada para reconstrução da imagem volumétrica e um algoritmo de segmentação virtual para operações de segmentação [26]. A simulação não leva em consideração os erros específicos relacionados ao equipamento e fenômenos físicos do processo de tomografia. Essa abordagem permitiu introduzir separadamente os efeitos de deriva térmica observados na seção 4.2. O objetivo foi verificar se os desvios característicos observados na linha circunferencial extraída do objeto teste foram de fato gerados principalmente pelos efeitos de deriva

térmica. As características geométricas (i.e. diâmetro da esfera, ampliação e tamanho do pixel) utilizadas na simulação foram as mesmas utilizadas na configuração experimental.

A simulação do deslocamento causado pelos efeitos de deriva térmica foi realizada a partir da resposta observada no sistema TC_A ilustrado na Figura 19 (i.e., com um deslocamento total de 0,1 mm nas projeções). Para melhor observar os efeitos na imagem volumétrica, uma simulação adicional utilizando um deslocamento exagerado total de 10 mm também foi feita.

Os resultados das simulações são apresentados na Figura 25. A imagem reconstruída cujas projeções foram simuladas com um deslocamento total de 10 mm, Figura 25 (a), apresenta uma notável área de penumbra na região de transição ar-material. O mesmo efeito está presente na imagem obtida com 0,1 mm de deslocamento total, Figura 25 (b), no entanto, não é claramente visível na imagem volumétrica na ampliação utilizada na ilustração.

Figura 25 - Dados de TC simulados: (a) esfera reconstruída com deslocamento total de 10 mm e (b) com deslocamento total de 0,1 mm; (c), (d) representações da linha circunferencial extraída de (b)



A análise da representação espacial e do conteúdo dinâmico das linhas circunferenciais extraídas a partir das imagens simuladas, Figuras 25 (c) e (d), evidencia a forte correlação com os resultados experimentais (Figuras 19 e 20). A partir dessas análises, é possível inferir que a descontinuidade resultante no perfil medido possui forte correlação com a deriva térmica do tomógrafo.

4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados de experimentos e simulações realizados a fim de investigar o comportamento de dois sistemas tomográficos em relação aos transientes térmicos ocorrentes durante a medição por TC.

É possível constatar a presença do transiente térmico em ambos os sistemas. No entanto, um melhor comportamento pode ser observado no sistema TC_B, podendo isso ser atribuído às melhorias nos sistemas de exaustão e arrefecimento implementadas pelo fabricante nesse sistema.

Uma avaliação geométrica foi realizada para caracterizar o efeito do transiente térmico, utilizando uma linha circunferencial extraída a partir do volume reconstruído de uma esfera calibrada. A verificação da independência do efeito observado da geometria da peça foi feita a partir dos dados obtidos por TC de três peças adicionais.

Pela notável semelhança entres os resultados obtidos na simulação com os resultados experimentais, pode-se concluir que os erros introduzidos por transientes térmicos são de natureza sistemática e apresentam características muito bem definidas. Um esforço na tentativa de corrigir esses erros é, portanto, válido.

5 PROPOSTA PARA REDUÇÃO DOS EFEITOS DE DERIVA TÉRMICA

Três estratégias básicas podem ser aplicadas buscando reduzir os erros de origem térmica em metro-TC: A) reduzir as variações de temperatura (i.e., com o uso de um eficiente sistema de exaustão); B) reduzir os efeitos das variações de temperatura (i.e., com o uso de materiais adequados nos elementos estruturais); C) quantificação e compensação do efeito de variações de temperatura (i.e., compensação numérica da deriva térmica). Este capítulo descreve uma avaliação experimental de uma estratégia do tipo C através do desenvolvimento e teste de um algoritmo de correção de deriva térmica.

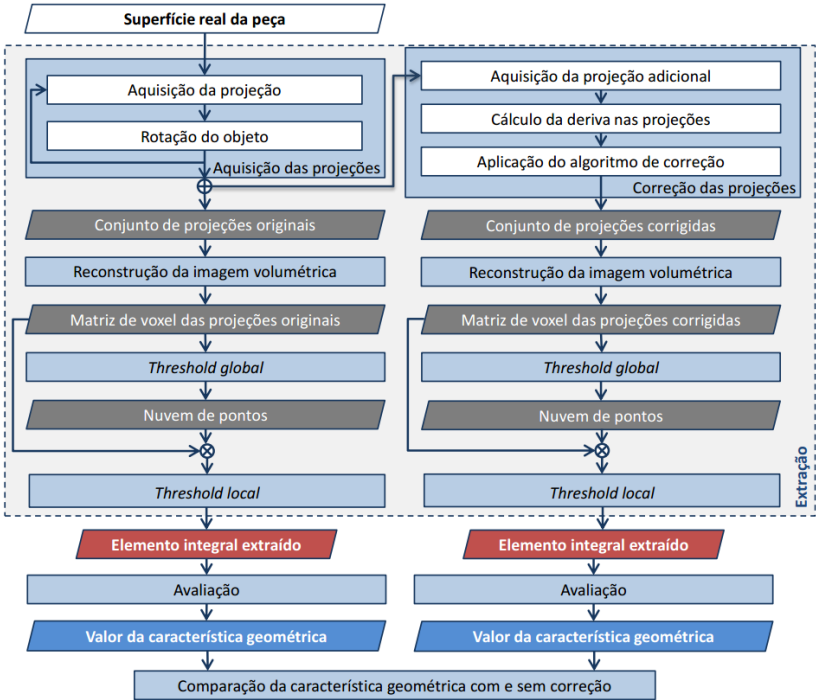
Adicionalmente, uma avaliação experimental da estratégia A foi realizada pela comparação do desempenho de dois tomógrafos (TC_A e TC_B) de diferentes gerações, porém de mesmo modelo. O mais recente (TC_B) é provido de um aprimorado sistema de exaustão e arrefecimento do tubo de raios X.

5.1 CORREÇÃO NUMÉRICA DA DERIVA TÉRMICA

Com base no comportamento observado na seção 4.2 uma estratégia de correção para compensar a deriva térmica foi desenvolvida e testada no sistema TC_A.

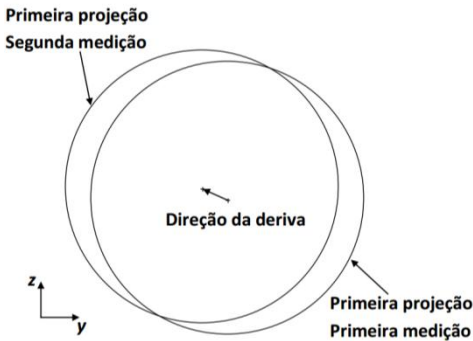
A estratégia consiste em adquirir uma projeção adicional, na mesma posição angular que a primeira projeção, logo após o processo de varredura ser finalizado (Figura 26). Para a primeira projeção e a projeção adicional, o centro da linha cuncunferencial extraída a partir da esfera de precisão é calculado como descrito na seção 4.2. O vetor deslocamento entre os centros dos dois círculos obtidos define a deriva total durante o processo de varredura (Figura 27).

Figura 26 - Cadeia de medição completa por metro-TC, abrangendo o processo de quantificação de deriva e correção das projeções



Fonte: Adaptado de [26]

Figura 27 - Vetor deslocamento da deriva



A correção a ser aplicada em cada uma das projeções é determinada através de uma interpolação linear, de acordo com a Eq. 2.

$$\overrightarrow{C_p} = \frac{\overrightarrow{Drift_1}}{n_p} \cdot (p - 1) \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$\overrightarrow{C_p}$: vetor correção para projeção p

$\overrightarrow{Drift_1}$: vetor deriva da 1ª primeira projeção

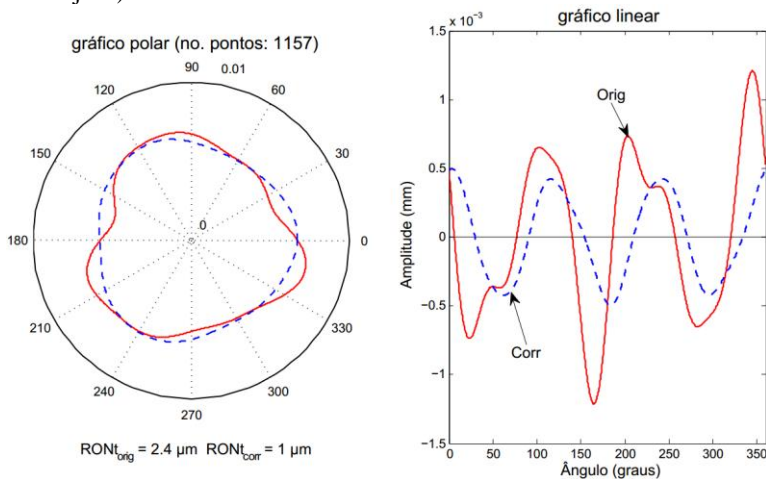
p : índice de 0 até n_p

n_p : número total de projeções

Visando avaliar a efetividade do método de correção proposto, foi realizada uma comparação entre resultados de medição obtidos com e sem correção. A comparação foi feita baseada nas linhas circunferenciais extraídas a partir do equador das esferas reconstruídas (Figura 18), e no desvio de circularidade pico-vale (RONt). Por ser obtido a partir de um padrão de referência, esse parâmetro pode ser considerado um indicador de qualidade da operação de extração [52]. Além disso, para minimizar a influência de desvios de superfícies aleatórios na comparação, todas as componentes harmônicas, exceto as causadas pela deriva térmica (3, 5, 7 e 9) OPR foram atenuadas. O círculo de referência foi calculado utilizando o critério dos mínimos quadrados. Para a avaliação descrita, 15 medições foram feitas, cada uma sendo a primeira medição do tomógrafo do dia, adquiridas durante aproximadamente duas semanas.

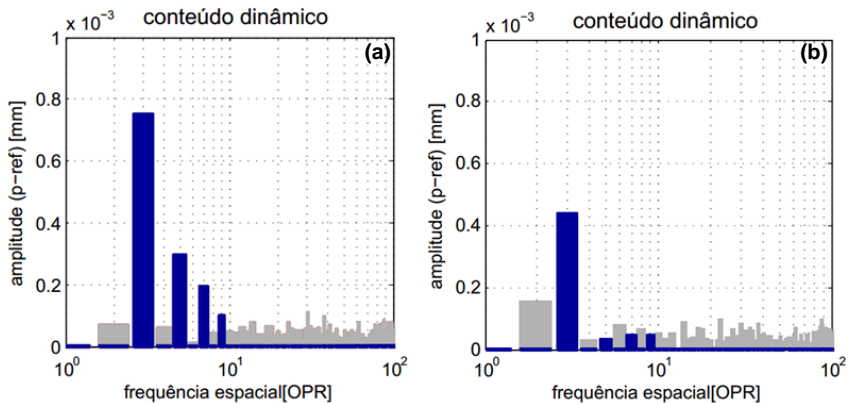
O resultado da análise da eficácia da correção proposta está apresentado nas Figuras 28, 29 e 30. A primeira apresenta os perfis de circularidade obtidos da esfera reconstruídas com correção (linha tracejada) e sem correção (linha sólida) para um determinado conjunto de projeções. Pode ser visualizado que o perfil de circularidade baseado na imagem corrigida apresenta um valor de RONt menor (1,0 μm) que a baseada na imagem não corrigida (2,4 μm). Além disso, pode ser observado também que a descontinuidade observada no perfil não corrigido, no eixo 0°–180°, é também reduzida.

Figura 28 - Comparação dos perfis circulares sem (linha sólida) e com correção (linha tracejada)



Os conteúdos dinâmicos dos perfis originais e corrigidos estão comparados na Figura 29. Pode-se observar uma redução significativa na amplitude da componente harmônica de 3 OPR no perfil corrigido. Além disso, as componentes de (5, 7 e 9) OPR foram reduzidas ao nível do ruído do sistema.

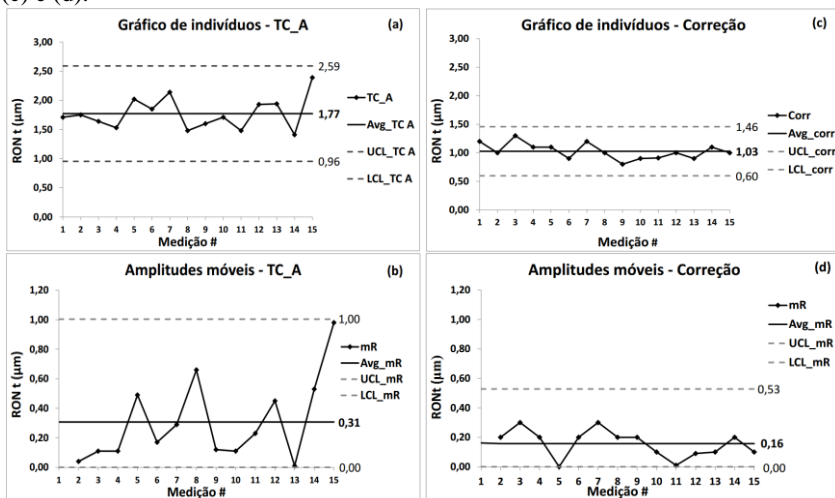
Figura 29 - Comparação dos conteúdos dinâmicos sem (a) e com correção (b)



Os resultados obtidos para os valores de RONT para as 15 medições realizadas são ilustrados na forma de um gráfico de indivíduos (Figura 30).

Os resultados obtidos a partir das imagens não corrigidas (a) apresentam limites de controle calculados com base em amplitudes móveis (b). Como todos os valores estão inseridos nos limites de controle, pode-se afirmar que o experimento foi executado em condições estáveis [54].

Figura 30 - Comparação dos valores de RONT obtidos sem (a) e (b), e com correção (c) e (d).



Diferenças significativas podem ser observadas entre os resultados corrigidos e não corrigidos. Com aplicação da correção, uma redução de aproximadamente 40% na média do valor de RONT pode ser observada, Figura 30 (a) e (c). Além disso, é válido ressaltar que a variação entre as medições se tornou menor nas imagens corrigidas. Esses resultados indicam uma melhoria consistente no valor de RONT utilizando correção de deriva térmica. Os resultados obtidos com a aplicação da correção foram publicados em [55].

5.2 COMPARAÇÃO COM OUTRAS ABORDAGENS (ESTRATÉGIA A)

Baseado no comportamento observado nas seções 4.2 e 4.3, uma análise mais detalhada dos dois sistemas tomográficos foi feita (TC_A e TC_B). Os experimentos foram realizados em versões diferentes de dois sistemas Carl Zeiss METROTOM 1500. O mais recente (TC_B) é equipado

com um aperfeiçoado sistema de exaustão da cabine e um atualizado sistema de arrefecimento no tubo de raios X.

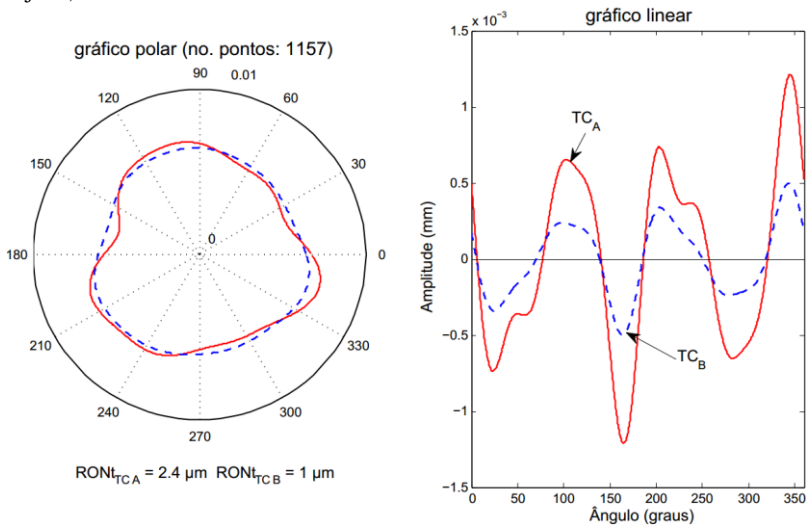
A fim de avaliar a efetividade da melhoria implementada no equipamento pelo fabricante, uma comparação experimental entre os sistemas tomográficos foi realizada. Os experimentos em ambos os sistemas foram feitos a partir da configuração experimental apresentada na seção 4.1.

A comparação foi feita baseada nas linhas circunferenciais extraídas a partir do equador das esferas reconstruídas e no desvio de circularidade (RONt). Para minimizar a influência dos desvios de superfícies aleatórios na comparação, todas as componentes harmônicas, exceto aquelas causadas pelo efeito de deriva térmica, (3, 5, 7 e 9) OPR, foram atenuadas. O círculo de referência foi calculado utilizando o critério dos mínimos quadrados.

Para a comparação, 15 medições foram realizadas em TC_B, cada uma sendo a primeira medição do dia, adquiridas durante aproximadamente duas semanas. Para TC_A foram utilizadas as mesmas medições da seção 5.1.

A comparação de dois perfis a partir de uma medição em cada sistema é apresentada na Figura 31, os valores obtidos foram de $RONt = 2,4 \mu m$ para TC_A e $RONt = 1,0 \mu m$ para o TC_B.

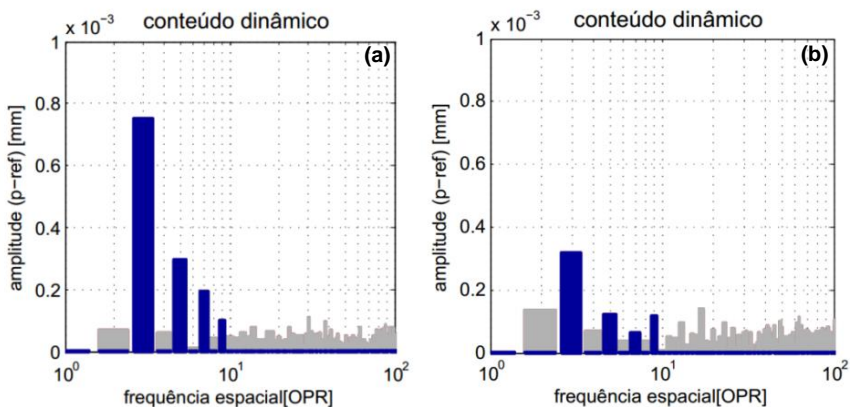
Figura 31 - Comparação dos perfis circulares TC_A (linha sólida) e TC_B (linha tracejada).



Os conteúdos dinâmicos dos perfis obtidos a partir de TC_A e TC_B são comparados na Figura 32. Uma redução na amplitude na harmônica de

3 OPR do perfil TC_B em relação a TC_A pode ser observada. Além disso, as componentes de (5 e 7) OPR foram reduzidas ao nível da harmônica de 9 OPR, que se encontra no nível do ruído do sinal.

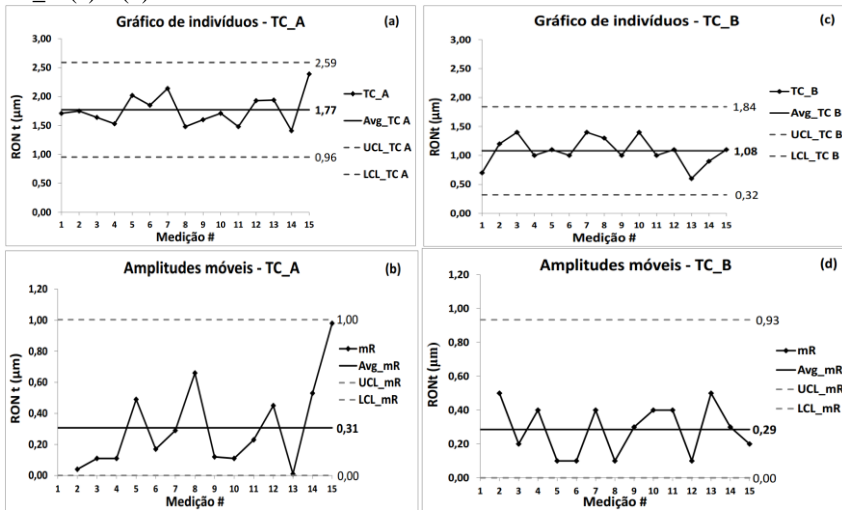
Figura 32 - Comparação dos conteúdos dinâmicos do sistema TC_A (a) com o sistema TC_B (b)



Os resultados obtidos a partir dos valores de RONT para as 15 repetições em cada tomógrafo são apresentados na Figura 33 (a) e (c). Os resultados apresentam limites de controle calculados baseados em um gráfico de amplitudes móveis, Figura 33 (b) e (d). Como todos os valores de RONT obtidos estão inseridos nos limites de controle estatístico, pode-se afirmar que os tomógrafos permaneceram estáveis durante os ciclos de medições [54].

Uma redução de aproximadamente 40% da média dos valores obtidos em TC_B em relação à TC_A foi observada. Os resultados indicam uma melhoria consistente nos valores da característica avaliada. Essa redução no desvio de forma da esfera provavelmente é atribuída à redução dos gradientes térmicos na câmara do tomógrafo, obtidas mediante a implementação de um sistema aprimorado de exaustão na cabine e de arrefecimento do tubo de raios X.

Figura 33 - Comparação dos valores de RONt obtidos em TC_A (a) e (b), e em TC_B (c) e (d)



5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Duas estratégias para minimizar os efeitos de deriva térmica em metro-TC foram avaliadas experimentalmente.

A primeira estratégia avaliada foi baseada na manipulação matemática das projeções. Os resultados obtidos evidenciam uma melhora significativa com a aplicação da correção proposta. Com a aplicação da correção, uma redução de aproximadamente 40% na média dos valores de RONt a partir de 15 medição foi alcançada.

A segunda estratégia avaliada baseia-se na redução dos gradientes térmicos através de melhorias no sistema de metro-TC implementado pelo fabricante. Essa estratégia foi avaliada positivamente. Também aqui, uma redução de aproximadamente 40% na média de RONt a partir de 15 medições foi observada. Porém, pode ser observado que a média de RONt obtida com a correção numérica é menor que a obtida com a redução dos gradientes térmicos, portanto, é válido a aplicação da correção numérica no sistema TC_B.

Sumarizando as duas abordagens avaliadas nesse trabalho, uma comparação contendo vantagens e desvantagens das estratégias estudadas foi realizada e está ilustrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação de vantagens e desvantagens das abordagens estudadas

Método avaliado	Correção numérica (estratégia C)	Redução de gradientes térmicos (estratégia A)
Reduz significativamente os efeitos de deriva	Sim	Sim
Aplicável para qualquer sistema de metro-TC	Sim	Não
Baixo custo	Sim	Não
Simples implementação	Sim	Não
Dependente da magnitude do erro	Não	Não
Tarefa realizada pelo fabricante	Não	Sim
Corrige totalmente os efeitos	Não	Não
Necessita de <i>softwares</i> externos para realização da tarefa	Sim	Não
Dependente do fabricante	Sim	Sim

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A possibilidade de uma análise holística em peças com geometria complexas faz com que a metro-TC seja considerada uma tecnologia promissora no âmbito da metrologia dimensional. No entanto, os avanços de sistemas de metro-TC como uma alternativa para os métodos convencionais de medição por coordenadas exigem equipamentos cada vez mais exatos. Não idealidades no processo de medição relacionadas a gradientes térmicos durante o processo de aquisição de imagem podem influenciar significativamente o resultado de medição por metro-TC. Neste trabalho foi realizado um estudo experimental da influência da deriva térmica em medições geométricas por metro-TC, bem como uma proposta de correção foi realizada e testada. Além disso, outra abordagem foi avaliada, por meio da comparação de dois sistemas de metro-TC de versões diferentes, o mais recente equipado com novos sistemas de exatidão e arrefecimento.

6.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos confirmam as expectativas iniciais a respeito da possibilidade de quantificar os erros de deriva térmica, bem como, promover melhorias operacionais em medições por metro-TC, através da redução de gradientes térmicos ou correção numérica através da manipulação matemática das projeções.

O método proposto para analisar a resposta do transiente dos sistemas baseado na esfera de precisão se mostrou eficaz para geração de conhecimento relacionado ao comportamento térmico dos sistemas. Em ambos os tomógrafos uma deriva térmica foi detectada no processo de aquisição das projeções. Uma diferença expressiva foi observada entre os sistemas. O sistema TC_B apresentou uma deriva no eixo horizontal ao detector de aproximadamente 5 vezes menor que o sistema TC_A. Esse comportamento pode ser atribuído ao novo conceito do sistema de exatidão implantado em TC_B.

A influência da deriva térmica em medições geométricas por metro-TC, em ambos os sistemas, foi investigada baseada na análise gráfica da medição do desvio de circularidade (RONt) da linha circunferencial no equador da esfera de precisão. A análise gráfica dos pontos extraídos, em representação polar e de conteúdo dinâmico, é uma ferramenta útil para estabelecer a magnitude e natureza dos desvios observados. Por ter sido

obtido de um padrão de referência, esse parâmetro pode ser considerado um parâmetro da qualidade da operação de extração. Os resultados apresentam, no gráfico polar, uma descontinuidade repetitiva do perfil no eixo 0° - 180° em ambos os sistemas. A descontinuidade do perfil produz harmônicas dominantes ímpares nas frequências espaciais de (3, 5, 7 e 9) OPR.

O comportamento sistemático do efeito de gradiente térmico foi observado na análise de três peças adicionais. Um artefato calibrado, um *step cylinder* e um padrão de múltiplas ondas (MWS) foram selecionados para a análise. O efeito de descontinuidade do perfil no eixo 0° - 180° também foi observado nessas peças.

Adicionalmente aos experimentos de investigação, um estudo de simulação foi realizado. A simulação permitiu perceber com clareza a forte correlação com os resultados experimentais. A partir dessas análises, é possível deduzir que a descontinuidade resultante no perfil medido está diretamente relacionada à deriva térmica do tomógrafo.

O método proposto para reduzir os efeitos de gradientes térmicos em medições geométricas por metro-TC foi baseado na manipulação matemática das projeções. A eficácia do método foi testada com base na comparação dos valores de desvios de circularidade (RONt) antes e depois da aplicação da correção. A partir da análise estatística dos resultados foi possível concluir que houve uma significativa redução de aproximadamente 40% na média dos valores de RONt com a aplicação da correção. Uma redução da amplitude das componentes ímpares harmônicas também pode ser observada nos gráficos de conteúdo dinâmico com aplicação da correção.

Além disso, outra estratégia de minimização dos efeitos de gradientes térmicos foi avaliada. Essa estratégia, baseada na redução das variações de temperatura no interior da blindagem do tomógrafo, foi avaliada pela comparação dos valores de RONt obtidos a partir de dois sistemas de metro-TC de mesmo modelo, porém versões diferentes. A versão mais recente é provida de um novo sistema de exaustão da cabine de blindagem e de arrefecimento do tubo de raios X, além de outras melhorias implementadas pelo fabricante no sistema de metro-TC. Também aqui uma significativa melhora foi observada nos resultados, o sistema mais recente apresentando uma média dos valores de RONt de também aproximadamente 40% menor que no sistema antigo.

Finalmente, com base nos resultados obtidos pode-se afirmar que:

- ✓ Uma deriva térmica significativa das projeções pôde ser observada em uma medição típica nos tomógrafos utilizados no estudo;

- ✓ A deriva das projeções causa distorções geométricas sistemáticas na imagem tridimensional reconstruída;
- ✓ O método de correção baseado na manipulação matemática das projeções se mostrou eficaz.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O método de extração de bordas da circunferência extraída a partir de uma projeção aplicado neste trabalho possui uma componente subjetiva dependente do operador, uma vez que a alteração dos parâmetros de extração de bordas pode ser realizada. Assim, sugere-se estudar as influências do algoritmo de detecção de bordas na posição do centro da circunferência na etapa de investigação da deriva térmica nas projeções.

Além disso, o método de quantificação da deriva térmica utilizado nesse trabalho não é aplicável a qualquer geometria de peça, já que depende da determinação do centro de uma circunferência extraída de uma projeção de uma esfera. Uma continuidade natural desse trabalho seria, portanto, o desenvolvimento de um método mais geral para quantificação da deriva.

Como uma possível alternativa ao desenvolvimento do método de quantificação da deriva para geometrias diversas, sugere-se a utilização da própria esfera de referência utilizada, porém, fixando-a na estrutura do equipamento, para que a mesma seja posicionada dentro do volume de medição juntamente com a peça a ser medida. Com essa abordagem, os algoritmos desenvolvidos nesse trabalho, poderão ser utilizados na quantificação da deriva nas projeções, bem como na correção da deriva térmica.

O método de correção utilizado é baseado em um modelo de correção linear. O desenvolvimento de um modelo de correção não linear (e.g. baseado na característica sistemática de deslocamento na imagem) é, portanto, válido.

Uma dificuldade encontrada durante a execução deste trabalho foi na parte de reconstrução das imagens corrigidas. Somente foi possível realizar esta tarefa pela aquisição de um módulo de reconstrução de imagens de um *software* independente ao tomógrafo. Neste contexto sugere-se, identificar os requisitos necessários para efetuar a correção no mesmo *software* de reconstrução fornecido com a máquina.

REFERÊNCIAS

- [1] WECKENMANN, A; KRAMER, P., **Computed tomography for application in manufacturing metrology**. *Key Engineering Materials*, v. 437, n 73. p. 73-78, 2010.
- [2] KRUTH, J. P; et al., **Computed tomography for dimensional metrology**, *CIRP annals - manufacturing technology*, v. 60, no. 2, p. 821- 842, 2011.
- [3] BRUNKE, O; SUPPES, A., **Precise 3D dimensional metrology using high-resolution x-ray computed tomography (μ CT)**. In: SPIE 7804, DEVELOPMENTS IN X-RAY TOMOGRAPHY VII, v. 7804, 2010.
- [4] FLISCH, A; et al., **Industrial computed tomography in reverse engineering applications**. IN: DGZFP - PROC. IN BB 67-CD, COMPUTERIZED TOMOGRAPHY FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS AND IMAGE PROCESSING IN RADIOLOGY, Germany, 1999.
- [5] BARBERO, B. R; URETA, E. S., **Comparative study of different digitization techniques and their accuracy**. *Computed- Aided Design*. v. 43, p 188-206, 2011.
- [6] Volume Graphics: **Solutions about voxels**, em <<http://www.volumegraphics.com/en/>>. Acesso em: 25 jun. 2013
- [7] HUDÁK, R; KAT'UCH, P; ŽIVČÁK, J., **Application of biomedical metrotomography**. In: 15th INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ENGINEERING SYSTEMS (INES), p. 411-415, Slovakia, 2011.
- [8] SKALA, V; **CT and MRI Data Processing for Rapid Prototyping**, In: 6th EUROPEAN COMPUTING CONFERENCE – WSEAS ECC'12, ADVANCES IN COMPUTER SCIENCE, p.499-504, Prague, 2012.
- [9] NEUSCHAEFER-RUBE, U. et al., **Measurement of micro gears: comparison of optical, tactile-optical, and CT measurements**, In: SPIE 7864, THREE-DIMENSIONAL IMAGING, INTERACTION, AND MEASUREMENT, v. 7864, 2011.
- [10] NORTH STAR IMAGING, INC., **Taking 3D inspection to a new dimension - 4D computed tomography**, em

<<http://www.4nsi.com/industrial-x-ray-news/taking-3d-x-ray-inspection-to-a-new-dimension-4d-computed-tomography>>. Acesso em: 25 jun. 2013.

- [11] BARTSCHER, M; NEUSCHAEFER-RUBE, U; WÄLDELE, F., **Computed tomography- a highly potential tool for industrial quality control and production near measurement**. In: 8th INTERNATIONAL SYMPOSIUM. ON MEASUREMENT AND QUALITY CONTROL IN PRODUCTION, Germany, 2004.
- [12] BARTSCHER, M. HILPERT, U. GOEBBELS, J. WEIDEMANN, G., **Enhancement and proof of accuracy of industrial computed tomography (CT) measurements**. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 56, no. 1, p. 495–498, 2007.
- [13] REISINGER, S; SCHMITT, M; VOLAND, V., **Geometric adjustment methods to improve reconstruction quality on rotational cone-beam systems**. In: iCT 2012 - DIMENSIONAL MEASUREMENT AND SPECIAL APPLICATIONS, Austria, 2012.
- [14] LETTENBAUER, H; WEIß, D., **X-ray image acquisition, processing and evaluation for CT-based dimensional metrology**. 52nd INTERNATIONALES WISSENSCHAFTLICHES KOLLOQUIUM TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU, p. 215- 220, Deutschland, 2007.
- [15] VOGELER, F. et al., **Positional stability of 2D x-ray images for computer tomography**, In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DIGITAL INDUSTRIAL RADIOLOGY AND COMPUTED TOMOGRAPHY, Germany, 2011.
- [16] WEISS, D. DEFFNER, A. KUHN, C., **Einfluss der Quellungsbewegung auf Reproduzierbarkeit und Antastabweichung im Röntgen- Computertomographen**, In: FACHTAGUNG INDUSTRIELLE COMPUTERTOMOGRAPHIE, Austria, 2010.
- [17] STEFFEN, J. P.; FRÖBA, T., **Reducing the focal spot shift of microfocus x-ray tubes to increase the accuracy of CT-based dimensional measurement**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DIGITAL INDUSTRIAL RADIOLOGY AND COMPUTED TOMOGRAPHY (DIR2011), Germany. Abstract, 2011.
- [18] WELKENHUYZEN, F. et al., **Industrial computed tomography, for dimensional metrology: overview of influence factors and**

- improvement strategies.** In: 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL MEASUREMENT TECHNIQUES, 2009, Belgium.
- [19] BUZUG, T. M., **Computed tomography**, Springer Verlag, 2008.
 - [20] KASPERL, S. HILLER, J. KRUMM, M., **Computed tomography metrology in industrial research and development.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NDT IN AEROSPACE, Germany, 2008.
 - [21] MITCHELL, K. W., **A generalized approach to wall thickness measurements in CT images**, In: Industrial computed tomography, USA, 1989, p. 120-124.
 - [22] WIACKER, H. **Dimensionsanalyse mit der Computertomografie am Beispiel Turbinenschaufelvermessung.** In: 2. SEMINAR COMPUTERTOMOGRAFIE, Deutschland, 1991, p. 86-93.
 - [23] CHRISTOPH, R. NEUMANN, H. J., **X-ray tomography in industrial metrology: precise, economical and universal**, Munich: Süddeutscher verlag onpact GmbH, 2011. 95 p.
 - [24] HEINZL, C. et al., **Fast estimation of optimal specimen placements in 3D X-ray computed tomography.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DIGITAL IND. RADIOLOGY AND CT, Germany, 2011, poster P6.
 - [25] VOET, A. et al., **A test object for calibration and accuracy assessment in X-ray CT metrology.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MEASUREMENT AND QUALITY CONTROL, Japan, 2010.
 - [26] NARDELLI, V. C. et al., **Feature-based analysis for quality assessment of x-ray computed tomography measurements**, *Measurement Science and Technology*. v. 23, n. 10, 2012.
 - [27] RADON, J., **Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten**, Ber. Sächs. Akad. Wiss, vol. 69, 1917.
 - [28] FELDKAMP, L. A. DAVIS, L. C. KRESS, J. W., **Practical cone-beam algorithm**, *Journal of the Optical Society of America A*, v. 1, no. 6, p. 612- 619, 1984.

- [29] OTSU, N., **A threshold selection method from gray-level histograms**, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. 9, no. 1, 1979.
- [30] CANNY, J., **A Computational approach to edge detection**, *IEEE Transcriptions on Patter Analysis and Machine Intelligence*, v. 8, n. 6, 1986.
- [31] LETTENBAUER, H. LOTZE, A. KUNZMANN, S. **Method and device for identifying material boundaries of a test object**, U.S. Patent 8,045,806, 2008.
- [32] REINHART, C., **Industrial computer tomography- A universal inspection tool**, In: 17th WORLD CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE TESTING (WCNDT), China, 2008.
- [33] WEIß, D. LETTENBAUER, H., **Optimized CT metrology through adaptive image processing techniques**, In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SURFACES, v. 12, Germany, 2008.
- [34] CARL ZEISS, **Metrotom - User Manual**, 2010.
- [35] ZEISS **Metrotom 1500**, em
<<http://www.zeiss.dk/Industriel%20Maaleteknik/Produkter/CT%20Skaning/Metrotom%201500.aspx>>. Acesso em: 11 jul. 2013
- [36] KUMAR, J. et al., **An analysis of the effect of cone-beam geometry and test object configuration on the measurement accuracy of a computed tomography scanner used for dimensional measurement**, *Measurement Science and Technology*, v. 22, n. 3, 2011.
- [37] WENIG, P. KASPERL, S., **Examination of the measurement uncertainty on dimensional measurements by X-ray computed tomography**, In 9th EUROPEAN CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING (ECNDT), Germany, 2006.
- [38] ANDREU, V. et al., **Analysis of the error sources of a computer tomography machine**. In: **Lamdap conference**, 2009. p. 462-471.
- [39] NEUMAYER, D. MODRICH, K-U., **Computed Tomography as a tool for industrial measurement**. In: 9th EUROPEAN CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING (ECNDT), Germany, 2006.

- [40] MÜLLER, P. et al., **New reference object for metrological performance testing of industrial CT systems**. In: 12th EUSPEN INTERNATIONAL CONFERENCE, Sweden, 2012.
- [41] CARMIGNATO, S. et al., **Testing of X-ray microtomography systems using a traceable geometrical standard**. *Measurement Science and. Technology*, v. 20, n. 8, 2009.
- [42] KIEKENS, K. et al., **A test object with parallel grooves for calibration and accuracy assessment of industrial computed tomography (CT) metrology**. *Measurement Science and Technology*, v. 22, n. 11, 2011.
- [43] BARTSCHER, M., **Industrial Computed tomography, an emerging coordinate measurement technology with high potentials**, IN: CSL INTERNATIONAL WORKSHOP SYMPOSIUM, USA, 2008.
- [44] CANTATORE, A. et al., **Verification of a CT scanner using a miniature step gauge**. In 11th EUSPEN INTERNATIONAL CONFERENCE, Italy, 2011.
- [45] HILLER, J. MAISL, M. REINDL, L., **Physical characterization and performance evaluation of a x-ray micro- computed tomography system for dimensional metrology applications**. *Measurement Science and. Technology*, v. 23, n. 8, 2012.
- [46] FRÖBA, T. STEFFEN, J. P., **Anforderungen an Röntgen-CT Spezialröhren und die technische Umsetzung**, In: FACHTAGUNG INDUSTRIELLE COMPUTERTOMOGRAPHIE, Austria, 2010.
- [47] VIDAL-MIGALLON, I. et al., **Simulation of mechanical misalignments in a cone-beam micro-CT system**, In: IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM CONFERENCE RECORD, Germany, 2009, p. 5007–5009.
- [48] BIPM, SI, **The International system of units. Bureau international des poids et mesures**, 180 p., 2006.
- [49] RENISHAW, **Technical specifications - Styli and accessories**, 2013.
- [50] NARDELLI, V. C., **Medição geométrica utilizando tomografia computadorizada por raios-x: melhoria do desempenho metrológico através da seleção sistemática dos parâmetros de configuração**.

137 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2013.

- [51] ARENHART, F. A. et al., **Design and implementation of an application for the analysis of extracted circumferential lines**. In: II INTERNATIONAL CONGRESS ON MECHANICAL METROLOGY (CIMMEC), Brazil. 2011.
- [52] NARDELLI, V. C. et al., **Using calibrated parts and integral surface analysis to investigate dimensional CT measurements**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DIGITAL INDUSTRIAL RADIOLOGY AND COMPUTED TOMOGRAPHY (DIR), Germany, 2011
- [53] ARENHART, F. A. et al., **Design of a multi-wave standard for evaluating the frequency response of ct measuring systems**, In: 11th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MEASUREMENT AND QUALITY CONTROL (ISMQC), Poland, 2013.
- [54] WHEELER, D. J., **Advanced Topics in Statistical Process Control: The Power of Shewhart's Charts**. Ed. 2. Knoxville, USA. SPC Press, 2004. p. 484.
- [55] OLIVEIRA, F. B. et al., **Investigation and minimization of thermal drift effects on tridimensional CT measurements**, In: 11th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF MEASUREMENT TECHNOLOGY AND INTELLIGENT INSTRUMENTS (ISMTII), Germany, 2013.